

Joanna Całus Moszko*, Barbara Bialecka*

POTENCJAŁ I ZASOBY METALI ZIEM RZADKICH W ŚWIECIE ORAZ W POLSCE

Artykuł przeglądowy

Streszczenie

Pierwiastki ziem rzadkich, tworzące grupę 15 lantanowców oraz skand i itr, określane są powszechnie skrótem REE (ang. *Rare Earth Elements*). Zaliczone zostały przez Unię Europejską do surowców krytycznych o znaczeniu strategicznym dla rozwoju nowoczesnych wysoko zawansowanych technologii. Niniejszy artykuł poświęcono występowaniu REE na świecie i w Polsce. Scharakteryzowano podstawowe technologie procesów pozyskiwania metali ziem rzadkich, a także omówiono główne możliwości ich praktycznego stosowania w różnych gałęziach gospodarki. Następnie przedstawiono perspektywiczne światowe zasoby naturalne i alternatywne dla omawianych pierwiastków, które mogą stać się ich cennym źródłem w ciągu najbliższych kilku lat.

Słowa kluczowe: *pierwiastki ziem rzadkich; występowanie; pozyskiwanie; zastosowanie; Polska; świat.*

The potential and resources of rare earth metals in the world and in Poland Review article

Abstract

Rare earth elements forming the group of 15 lanthanides as well as scandium and yttrium are referred to commonly as REE. They have been numbered by the European Union as critical resources of strategic importance for the development of modern advanced technologies. The present article was devoted to discuss the occurrence of REE in the world and in Poland. Basic technologies for rare earth metals extraction processes have been characterized, and also the main capabilities of their practical application in different branches of the economy have been discussed. Then, the list of prospective world natural resources and the elements alternative to those discussed, which can become their valuable source over the next few years, have been presented.

Keywords: *rare earth elements; occurrence; acquisition; application; Poland; world.*

1. WPROWADZENIE

Pierwiastki ziem rzadkich to grupa 15 lantanowców oraz skand i itr, określane jako REE (ang. *Rare Earth Elements*). Charakteryzują się zbliżoną budową zewnętrznymi powłokami elektronowymi, co powoduje, że wykazują podobne właściwości chemiczne. Pierwiastki ziem rzadkich odkryte zostały na przełomie wieku XIX i XX. Wbrew swojej nazwie nie są pierwiastkami rzadko występującymi, jednak duży problem stanowi ich rozproszenie.

Tabela 1 przedstawia pierwiastki ziem rzadkich, z uwzględnieniem ich podziału.

*Główny Instytut Górnictwa, j.moszko@gig.eu, bbialecka@gig.eu

Tabela 1. Różne systemy podziału pierwiastków ziem rzadkich (Charewicz 1990)

System	Podział													
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Lu	Y
1.	Grupa cerowa							Grupa itrowa						
2.	Grupa cerowa							Grupa itrowa						
3.	Grupa cerowa			Grupa terbowa				Grupa itrowa						
4.	LREE*							HREE**						

*Pierwiastki ziem rzadkich lekkie, ** pierwiastki ziem rzadkich ciężkie.

Związki większości lantanowców charakteryzuje intensywne zabarwienie, które nie ulega zmianie w roztworach. W przyrodzie występują głównie w postaci fosforanów oraz krzemianów. Do głównych minerałów zawierających lantanowce należą (Bielański 2002):

- **monacyt $CePO_4$** – występuje w złożach pegmatytowych, granitowych i gnejsach oraz w piaskach monacytowych,
- **bastnazyt $LnFCO_3$** – występuje w Kalifornii,
- **gadolinit $Y_2FeBe_2Si_2O_{10}$** .

Od drugiej połowy wieku XIX do lat 80. wieku XX metale ziem rzadkich pochodziły głównie z Doliny Mountain w Kalifornii w Stanach Zjednoczonych. Do początku lat 90. wieku XX znaczącym producentem była także Australia. Od roku 1998 ponad 80% produkcji REE pochodzi z Chin. Obecnie to właśnie Chiny, dysponujące 23% zasobów światowych (ok. 55 mln Mg), dostarczają 93% światowego zapotrzebowania na surowce ziem rzadkich. Największe złożo Bayan Obo znajduje się na terytorium Mongolii Wewnętrznej należącej do Chin. Odkryte zostało przez Rosjan w roku 1927 (Argali 1980). Złożo zawiera około 1,5 bln Mg rudy żelaza i 48 mln Mg tlenków metali REE, a także około 1 mln Mg niobu.

Światowe wydobycie REE kształtuje się obecnie na poziomie 139 tys. Mg. Oszacowano, że w roku 2014 zapotrzebowanie na REE będzie wynosiło około 200 tys. Mg. W tabeli 2 przedstawiono głównych producentów pierwiastków ziem rzadkich na świecie.

Tabela 2. Główni producenci REE na świecie

Producent	Wydobycie, Mg	Udział w rynku, %
Chiny	130 000 ¹	> 93
USA	3 500 ²	2,5
Indie	3 000	2,1
Rosja	2 000 ³	1,4
Brazylia	550 ¹	–
Malezja	30 ¹	–

Opracowanie własne na podstawie: ¹ U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2012, ² Molycorp 2011, ³Castor, Hedrick 2006.

Na całym świecie trwają poszukiwania nowych źródeł pozyskiwania metali ziem rzadkich w celu zapewnienia bezpieczeństwa rozwoju nowoczesnych technologii. Polska nie posiada własnych zasobów surowcowych REE, a stwierdzone występowanie pierwiastków ziem rzadkich w Sudetach oraz w rejonie Szklarskiej Poręby i Mar-

kocic nie ma charakteru złożowego (Radwanek-Bąk 2011). Podejmowane są jednak starania o uzyskanie dostępu i możliwość eksploatacji złóż znajdujących się w Mongolii. Innym rozwiązaniem są technologie odzysku lantanowców ze zużytego sprzętu elektronicznego. W literaturze światowej (Eskenazy 1987a,b, 1999; Birk, White 1991; Finkelman i in. 1993; Finkelman 1994; Seredin, Shpirt 1995; Seredin 1996; Hower, Ruppert, Eble 1999; Ren i in. 1999; Pollock i in. 2000; Zhou, Bohor, Ren 2000; Dai i in. 2006, 2008, 2010, 2011, 2012) wykazano ponadto obecność pierwiastków ziem rzadkich w węglu kamiennym oraz w odpadach elektrowniowych. W Polsce dotychczas nie prowadzono szerszych badań omawianego zagadnienia, a fragmentaryczne dane nie pozwalają na określenie zasobności polskiego węgla w REE.

2. TECHNOLOGIE POZYSKIWANIA REE

Pierwiastki ziem rzadkich pozyskiwane są przede wszystkim z dwóch minerałów: batnaesytu (95%) oraz monacytu. Proces pozyskiwania koncentratów metali ziem rzadkich ze względu na ich niską koncentrację jest procesem złożonym, zależnym od składu chemicznego rudy i składającym się z połączenia szeregu różnorodnych metod przerobczych. W Mountain Pass jako podstawową metodę stosowano flotację oraz ługowanie kwasem solnym, uzyskując 70% koncentrat (Castor, Hedrick 2006). Do przeróbki rud monacytowych i ksenotymu stosuje się metody grawitacyjne z zastosowaniem osadzarek, spiral, koncentratorów stożkowych oraz stołów koncentracyjnych. Stosowane są również metody magnetycznego elektrostatycznego rozdzielania oraz rozpuszczanie w gorących stężonych roztworach kwasów i ekstrakcje za pomocą stężonego NaOH (Castor, Hedrick 2006). Przykładowo w Baotou koncentrat mineralny wyprażany jest z kwasem siarkowym w temperaturze 300–600°C. Następnie za pomocą wody pierwiastki REE są wyplukiwane do roztworu, a inne składniki są wytrącane do odpadów.

Rosyjski koncentrat łoparytowy produkowany jest w młynie w ilości do 6,5 tys. Mg rocznie. Proces zagęszczania odbywa się z wykorzystaniem metod grawitacyjnych i elektromagnetycznych. Pozwala to na uzyskiwanie koncentratu zawierającego 95% łoparytu. Planowana jest rozbudowa zakładu, pozwalająca na wyprodukowanie 2,5 tys. Mg łoparytu rocznie. Rosyjski koncentrat łoparytowy przetwarzany jest przy użyciu gazowego chlorowania, w wysokiej temperaturze, w obecności czynników redukujących.

Rozdzielanie lantanowców z roztworów stanowi najtrudniejszy etap pozyskiwania metali ziem rzadkich. W tym celu stosowane są następujące metody:

- metoda frakcjonowanej krystalizacji,
- frakcjonowane strącanie z roztworu,
- chromatografia jonowymienna,
- ekstrakcja.

Ostatnie dwie metody uznawane są za najskuteczniejsze, gdyż pozwalają na uzyskanie koncentratów 99,99%, w ilościach kilogramowych (Bielański 2002).

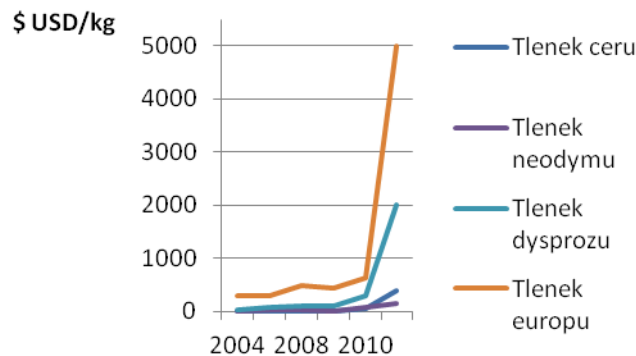
Stosowane technologie nie są obojętne dla środowiska. Koncentraty pierwiastków ziem rzadkich pozyskuje się w wyniku wzbogacania olbrzymich ilości rud będących

nośnikiem minerałów zawierających REE, co powoduje degradację znacznych obszarów ziemi. Ponadto problemem są duże ilości odpadów powstających przy skomplikowanych procesach przerobczych. Pewną perspektywą dla poszanowania środowiska są technologie pozyskiwania metali REE z surowców odpadowych, głównie ze zużytego sprzętu elektronicznego lub odpadów elektrownianych.

3. CZYNNIKI EKONOMICZNE

Od roku 1960 ceny oraz wielkość produkcji metali ziem rzadkich na rynku światowym systematycznie rosną. W odpowiedzi na rozwój nowych technologii systematycznie zwiększa się zapotrzebowanie na te pierwiastki. Na początku lat 90. wieku XX znacznie wzrosła produkcja, zwłaszcza za sprawą Chin. Zastosowane przez nich ceny dumpingowe wyeliminowały z rynku pozostałych producentów. W ten sposób Chiny stały się głównym dostawcą metali ziem rzadkich na rynku światowym. Jednak w ostatnich latach kraj ten systematycznie obniżał transze eksportowe REE, a ich ceny gwałtownie wzrosły. Według oficjalnych informacji jest to spowodowane troską o ochronę środowiska oraz kurczącymi się zasobami naturalnymi. Światowa Organizacja Handlu (ang. *World Trade Organization* – WTO) rozważa wprowadzenie sankcji wobec Chin w celu zaprzestania prowadzenia takiej polityki surowcowej. Chiny stanowczo odrzucają oskarżenia o stosowanie praktyk monopolistycznych w handlu międzynarodowym. W czerwcu roku 2012 opublikowały „Białą Księgę” pierwiastków ziem rzadkich, w której wzywają kraje rozwinięte do współpracy w dziedzinie eksploatacji złóż, zwłaszcza zaawansowanych technologii. Apelują także o większe inwestycje, mające na celu recykling REE.

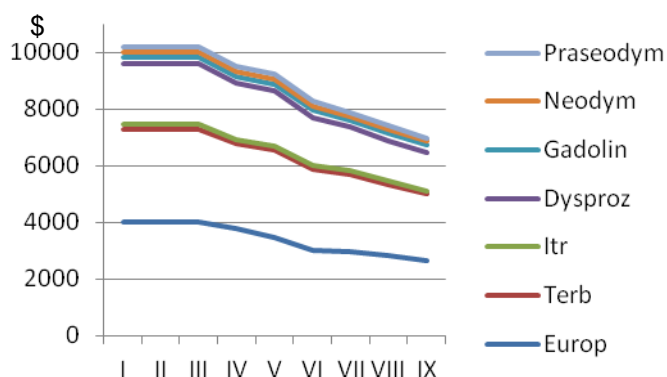
W roku 2011 średnia cena tlenków metali ziem rzadkich wzrosła o 537% w porównaniu z rokiem 2010, a w ciągu pierwszych 5 miesięcy roku 2012 o kolejne 10%, przy ograniczeniu w tym czasie eksportu o 56%. W tym samym roku Chiny ustaliły wysokość pierwszej transzy eksportowej na 10,5 tys. Mg. Na rysunku 1 przedstawiono wzrost cen wybranych tlenków metali ziem rzadkich w ostatnich latach.



Rys. 1. Zmiana cen wybranych tlenków REE na rynku światowym (oprac. własne na podstawie danych FOB China)

Fig. 1. The change of prices of selected REE oxides on the world market (own elaboration on the basis of FOB China)

Po pierwszym kwartale roku 2012 ceny koncentratów podstawowych metali ziem rzadkich na rynku światowym zaczęły systematycznie spadać (rys. 2). Przyczyną takiej sytuacji jest odkrycie nowych perspektywicznych złóż tych cennych pierwiastków, a także systematyczne otwieranie nowych kopalń oraz uruchamianie kolejnych nowych projektów poszukiwawczych.



Rys. 2. Zmiana cen wybranych koncentratów metali ziem rzadkich w roku 2012 (oprac. własne na podstawie FOB China)

Fig. 2. The change of prices of selected metal concentrates of rare earth in 2012 (own elaboration on the basis of FOB China)

4. POTENCJAŁ I MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA PIERWIĄSTKÓW ZIEM RZADKICH

Lantanowce w stanie wolnym są srebrzystobiałymi metalami, miękkimi i kowalnymi. Około 25% produkowanych metali REE stosowanych jest w postaci metalicznej, jako tzw. metal mieszany składający się z (Bielański 2002):

- 45–50% ceru,
- 22–25% lantanu,
- 18% neodymu,
- 5% preodymu,
- 1% samaru o właściwościach odtleniających i odsiarczających.

W tabeli 3 przedstawiono najczęstsze zastosowanie wybranych metali ziem rzadkich w wysoko rozwiniętych technologiach.

Tabela 3. Możliwości wykorzystania i charakterystyka wybranych metali ziem rzadkich w gospodarce (oprac. własne na podstawie: Los Alamos National Laboratory, Molycorp – <http://www.molycorp.com/resources/the-rare-earth-elements>)

Pierwiastek	Charakterystyka	Zastosowanie
LANTAN	doskonale właściwości magnetyczne, łatwo palny, gęstość 6,1 g/cm ³	dodatek do stopów metali stosowanych w produkcji katod w ogniach paliwowych, w akumulatorach, w urządzeniach medycznych i optycznych
CER	bardzo czuły, łatwo palny, gęstość 6,7 g/cm ³ , punkt topnienia 795°C	ze względu na unikalne właściwości stosowany do produkcji katalizatorów, w nowoczesnych kineskopach w filtrach UV
EUROP	najrzadszy z ziem rzadkich, łatwo palny, gęstość 5,2 g/cm ³ , punkt topnienia 826°C	pierwotnie zastosowany w produkcji czerwonego fosforu, do ekranów telewizorów CRT, aktualnie używany do produkcji energooszczędnego oświetlenia LED, kolorowych lamp, monitorów, w medycynie jako bardzo czuły znacznik
ERB	wysoka rezystancja, łatwo palny, gęstość 9,0 g/cm ³ , punkt topnienia 1529°C	do barwienia szkła na różowy odcień (np. w okularach przeciwsłonecznych), do konstrukcji laserów stosowanych, np. w medycynie, w operacjach skóry oraz w stomatologii w światłowodach
NEODYM	doskonale właściwości magnetyczne, łatwo palny, gęstość 6,8 g/cm ³ , punkt topnienia 1024°C	istotne znaczenie dla produkcji silnych magnesów, MRI, generatorów, w samochodach elektrycznych, w laserach i głośnikach
ITR	tworzy ciemną warstwę pod wpływem światła, łatwo palny, gęstość 4,5 g/cm ³ , punkt topnienia 1526°C	stosowany w reaktorach jądrowych, w metalurgii, w technologiach laserowych, w ogniach paliwowych, w technologiach mikrofalowych, w nowoczesnej technice samochodowej
GADOLIN	łatwo palny, gęstość 7,9 g/cm ³ , punkt topnienia 1312°C	używany do pamięci magnetycznej, w kryształach przewodzących jonowo, ma silne właściwości nadprzewodzące, poprawia urabialność i odporność żelaza oraz chromu, stosowany jako luminofor koloru w telewizorach, w kuchenkach mikrofalowych, w technologiach radarowych, w reaktorach jądrowych
DYSPROZ	bardzo czuły, rozciągliwy i giętki, łatwo palny, gęstość 8,6 g/cm ³ , punkt topnienia 1407°C	stosowany w aplikacjach nuklearnych, w żarówkach energooszczędnych, do produkcji laserów, w magnesach stałych, w nowych agregatach prądowórczych, w samochodach elektrycznych
HOLM	doskonale właściwości magnetyczne, miękki i ciągliwy, gęstość 8,8 g/cm ³ , punkt topnienia 1461°C	do wytwarzania silnych pól magnetycznych
LUTET	miękki i elastyczny, łatwo palny gęstość 9,8 g/cm ³ , punkt topnienia 1652°C	głównie w medycynie nuklearnej, w tomografii komputerowej
PRAZEODYM	bardzo miękki, łatwo palny, gęstość 6,1 g/cm ³ , punkt topnienia 920°C	w stopach do zmiany właściwości metali
SAMAR	gęstość 7,4 g/cm ³ , punkt topnienia 1072°C	w medycynie, w laserach, jako materiał magnetyczny, do absorpcji światła podczerwonego, jako katalizator
TERB	gęstość 8,2 g/cm ³ , punkt topnienia 1356°C	w przemyśle półprzewodników, w ogniach paliwowych, w nowoczesnych lampach, w laserach, w magnetycznych nośnikach danych, w magnesach stałych, w silnikach stosowanych w samochodach elektrycznych

5. WYSTĘPOWANIE PIERWIASTKÓW ZIEM RZADKICH W POLSCE

W Polsce pierwiastki ziem rzadkich występują:

- w Sudetach,
- w rejonie Szklarskiej Poręby i Markocic,
- w południowo-wschodniej Polsce w masywie Tajna.

Są to złoża związane głównie z monacytem, ksenotymem, apatytem oraz karbonatami. Ich zawartość wynosi od 0,15 do 5,72% (Charewicz 1990).

Pierwiastki ziem rzadkich związane są również z odpadami fosfogipsów. Przykładowo hałda w Wizowie, o udokumentowanej pojemności 2 mln Mg zawiera 8 tys. Mg REE, w tym 200 Mg itru i 30 Mg europu. Inne mniejsze składowiska fosfogipsów, które mogłyby stać się źródłem REE, znajdują się w Gdańsku oraz Policach.

Dotychczas nie wykonano szerszych badań poświęconych zawartości w polskim węglu kamiennym pierwiastków ziem rzadkich. W badaniach prowadzonych przez Hanak (Hanak, Kokowska-Pawłowska, Nowak 2011) analizowano węgiel z pokładu 405. Uwagę zwraca wysoka zawartość ceru w stosunku do średniej zawartości w węglu chińskim oraz średniej światowej. Inne badania na dwóch próbkach węgla (Smółka-Danielowska 2010; Całus Moszko 2012), wykazują znacznie niższą zawartość pierwiastków ziem rzadkich w badanym węglu. Parzentny (2008) w uzyskanych wynikach podkreśla wyższą od średniej światowej zawartość lantanu.

Badania popiołów lotnych z procesu spalania węgla kamiennego na zawartość niektórych lantanowców w elektrowniach Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego prowadziła Smółka-Danielowska (2007, 2010) oraz Całus Moszko (2012). Stwierdzono, że koncentracja pierwiastków w popiołach jest od kilku do kilkudziesięciu razy wyższa w stosunku do ich zawartości w węglu kamiennym. We wszystkich badanych odpadach ze spalania węgla kamiennego zwraca uwagę wysoka zawartość ceru (39–186 ppm) oraz lantanu (16–86 ppm), co może być nowym, alternatywnym i perspektywicznym źródłem ich pozyskiwania.

6. PERSPEKTYWICZNE ŹRÓDŁA POZYSKIWANIA PIERWIASTKÓW ZIEM RZADKICH

W czerwcu roku 2010 na posiedzeniu Grupy ds. Dostaw Surowców w Brukseli zaprezentowano raport o krytycznych surowcach mineralnych dla Unii Europejskiej. Wśród umieszczonych na liście 14 surowców, ze 110 ogółem występujących w gospodarce światowej, znalazły się także metale ziem rzadkich. Według niektórych autorów (Smakowski 2011) na miano pierwiastków krytycznych zasługują tylko trzy: niob, tantal oraz grupa metali ziem rzadkich. Na świecie prowadzone są liczne projekty poszukiwawcze, pozwalające na uniezależnienie od eksportu REE z Chin. W Hanoi za 5,5 mln dolarów otwarto Centrum Badań i Eksploatacji Pierwiastków Ziem Rzadkich, finansowane przez Japonię oraz Wietnam. Nawiązano współpracę z Kazachstanem, Indiami i Australią. Japończycy odkryli bogate złoża REE na dnie Oceanu Spokojnego (rys. 3), gdzie przebadano ponad 2000 próbek z 78 odwiertów, stwierdzając,

Tabela 4. Perspektywiczne źródła pozyskania REE (oprac. własne na podstawie Charewicz 1990; Castor, Hedrick 2006)

Źródło	Kraj	Zasoby, Mg	Zawartość tlenków REE, %	Dostępność/Uwagi
Źródła naturalne				
Bayan Obo	Chiny	48 000 000	6	aktualnie eksploatowane
Araxa	Brazylia	8 100 000	1,8	
Mountain Pass	USA	1 300 000	5–15	aktualnie eksploatowane, kopalnia Molycorp Minerals LLC uruchomiona w 2012 r.
Mount Weld	Australia	1 700 000	11,2	-
Dubbo	Australia	700 000	0,86	-
Mrima Hill	Kenia	300 000	5	-
Nolans Bore	Australia	150 000	4	-
Nam Nam Xe	Wietnam	4 745 000	0,8–36,2	-
Dong Pao	Wietnam	7 000 000	3–10	-
Xunwu and Longan	Chiny	b.d.	0,05–0,2	aktualnie eksploatowane
Lovozero	Rosja	b.d.	0,01	aktualnie eksploatowane
Maoniuping	Chiny	b.d.	2	aktualnie eksploatowane
Weishan	Chiny	b.d.	1,6	aktualnie eksploatowane
Aktyus	Kirgistan	b.d.	0,25	aktualnie eksploatowane
Eneabba	Australia	b.d.	0,001	aktualnie eksploatowane
Syberia (Jakucja, rejon Irkucka i Murmańska)	Rosja	19 000 000	b.d.	w 2010 r. wyprodukowano 2,3 tys. Mg tlenków REE
Grenlandia		b.d.	b.d.	o złoża stara się UE oraz Chiny
Złóża na dnie Oceanu Spokojnego	Japonia	obszar 1 km ² wokół każdego z otworów dostarczyłby 20% rocznego zapotrzebowania na te metale na świecie	b.d.	etap badań
Starkwitz	Niemcy	38 000	b.d.	dodatkowo złożo zawiera około 8 Mg niobu
Rejon Korsnas, Siilinjarvi i Laivajoki	Finlandia		b.d.	projekty realizowane przez firmę Tasman Metals
Źródła alternatywne				
Surowce wtórne (odpady z przemysłu elektrycznego i elektronicznego)	Unia Europejska	17 kg odpadów na jednego mieszkańca UE	możliwy odzysk 70–80% metali (w tym REE) z odpadów elektrycznych i elektronicznych	ilość tych odpadów wzrasta w tempie 3–5% na rok
Hałda fosfogipsów	Polska	8000	-	hałda w Wizowie (Charewicz 1990)
Popioły elektrowniane	Polska	630	-	szacunki własne przy założeniu: 2,5 mln Mg/rok popiołów do odzysku i zawartości ΣREE 280 ppm
Złóża węgla kamiennego	Polska	1400	-	szacunki własne przy założeniu: zasoby węgla 14 mln Mg (ok. 20% rocznego wydobycia) i ΣREE 114 ppm

W Polsce perspektywnym kierunkiem wykorzystania odpadów elektrowniowych ze spalania węgla kamiennego jest odzysk z nich metali, w tym pierwiastków ziem rzadkich. W popiołach elektrowniowych stwierdzono występowanie związków aż 81 metali (Hycnar 1987), w tym spośród REE: lantanu, ceru, neodymu, itru oraz pozostałych w mniejszych ilościach. Koncentracja pierwiastków w popiołach jest od kilku do kilkudziesięciu razy wyższa w stosunku do ich zawartości w węglu kamiennym, co może stanowić nowe, alternatywne i perspektywiczne źródło ich pozyskiwania.

7. PODSUMOWANIE

W świetle przeprowadzonego przeglądu literatury można wysunąć następujące wnioski:

1. Światowe wydobycie metali ziem rzadkich kształtuje się obecnie na poziomie 139 tys. Mg. Oszacowano, że w roku 2014 zapotrzebowanie na pierwiastki ziem rzadkich będzie wynosiło około 200 tys. Mg ze względu na rozwój nowoczesnych wysoko zawansowanych technologii uwarunkowanych dostępnością pierwiastków REE.
2. Aktualnie głównym producentem REE są Chiny, które dostarczają 93% światowej produkcji.
3. W ostatnich latach nastąpił gwałtowny wzrost cen REE na rynku światowym oraz jednocześnie ograniczanie dostaw REE przez Chiny.
4. Znalezienie alternatywnych źródeł REE pozwoli na ustabilizowanie cen tych pierwiastków, zapewniając bezpieczeństwo dalszego rozwoju nowych, innowacyjnych technologii.
5. Stosowane technologie pozyskiwania REE są polutogenne ze względu na degradację środowiska. Pewną perspektywą, zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju, może być pozyskiwanie metali ziem rzadkich ze źródeł alternatywnych, np. recykling zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego.
6. Polska nie posiada własnych depozytów naturalnych REE. Źródła alternatywne stanowią odpady fosfogipsów, np. hałda w Wizowie, z której można pozyskać około 8 tys. Mg REE oraz odpady elektrowniane ze względu na bogate zasoby węgla kamiennego i duży udział energetyki węglowej w produkcji energii.
7. W Polsce dotychczas nie prowadzono szerszych badań na temat występowania REE w popiołach elektrowniowych i węglach kamiennych, a fragmentaryczne dane nie pozwalają na określenie zasobności polskiego węgla w REE. Niezbędne jest określenie zawartości metali ziem rzadkich w polskim węglu kamiennym.
8. Główny Instytut Górnictwa w Katowicach rozpoczął badania zmierzające do określenia potencjału pierwiastków ziem rzadkich w warunkach polskiego górnictwa węgla kamiennego, obejmując analizą wszystkie etapy łańcucha węglowego.

Literatura

1. Argali G.O. (1980): Tree iron ore bodies of Bayan Obo. World Mining January, San Francisco.
2. Bielański A. (2002): Podstawy chemii nieorganicznej (Fundamentals of Inorganic Chemistry). Warszawa, Wydaw. Naukowe PWN.

3. Birk D., White J.C. (1991): Rare earth elements in bituminous coals and underclays of the Sydney basin, Nova Scotia – elements sites, distribution, mineralogy. *International Journal of Coal Geology* Vol. 19, s. 219–251.
4. Całus Moszko J. (2012): Występowanie metali ziem rzadkich w warunkach polskich węgla kamiennych. Praca z działalności statutowej GIG. Katowice, Główny Instytut Górnictwa (niepublikowana).
5. Castor B., Hedrick J.B. (2006): Rare Earth Elements. *Industrial Minerals and Rocks*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, s. 769–792.
6. Charewicz W. (1990): Pierwiastki ziem rzadkich. Surowce, technologia, zastosowania. Warszawa, Wydaw. WNT.
7. Dai S.F. i inni (2012a): Mineralogical and geochemical compositions of the Pennsylvanian coal in the Adaohai Mine, Daqingshan Coalfield, Inner Mongolia, China: Modes of occurrence and origin of diaspore, gorceixite and ammonianillite. *International Journal of Coal Geology* Vol. 94, s. 250–270.
8. Dai S.F. i inni (2012b): Mineralogical and geochemical compositions of the Pennsylvanian coal in the Adaohai Mine, Daqingshan Coalfield. Inner Mongolia, China: Modes of occurrence and origin of diaspore, gorceixite and ammonianillite. *International Journal of Coal Geology* Vol. 94, s. 250–270.
9. Dai S., Tian L., Chou C. i inni (2008): Mineralogical and compositional characteristics of Late Permian coals from an area of high lung cancer rate in Xuan Wei, Yunnan, China: Occurrence and origin of quartz and chamosite. *International Journal of Coal Geology* Vol. 76, issue 4, s. 318–327.
10. Dai S., Wang X., Chen W. i inni (2010): A high-pyrite semianthracite of Late Permian age in the Songzao Coalfield. South western China: Mineralogical and geochemical relations with underlying mafic tuffs. *International Journal of Coal Geology* Vol. 83, issue 4, s. 430–445.
11. Dai S., Wang X., Zhou Y. i inni (2011): Chemical and mineralogical compositions of silicic, mafic and alkali tonsteins in the late Permian coals from the Songzao Coalfield, Chongqing, Southwest China. *Chemical Geology* Vol. 282, issues 1–2, s. 29–44.
12. Dai S.F., Ren D.Y., Chou C.L., Li S.S., Jiang Y.F. (2006): Mineralogy and geochemistry of the No. 6 coal (Pennsylvanian) in the Junger Coalfield. Ordos Basin, China. *International Journal of Coal Geology* Vol. 66, s. 253–270.
13. Dai S., Ren D., Chou C.L., Finkelman R.B., Seredin V.V., Zhou Y. (2012): Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization. *International Journal of Coal Geology* Vol. 94, s. 3–21.
14. Dai S., Wang X., Seredin V.V., Hower J.C., Ward C.R., O’Keefe J.M.K., Huang W., Li T., Li X., Liu H., Xue W., Zhao L. (2012): Petrology, mineralogy and geochemistry of the Gerich coal from the Wulantuga Ge ore deposit. Inner Mongolia, China: New data and genetic implications. *International Journal of Coal Geology* Vol. 90, s. 72–99.
15. Eskenazy G.M. (1987a): Rare earth elements and yttrium in lithotypes of Bulgarian coals. *Organic Geochemistry* Vol. 11, issue 2, s. 83–89.
16. Eskenazy G.M. (1987b): Rare-earth elements in a sampled coal from pirin deposit, Bulgaria. *International Journal of Coal Geology* Vol. 7, s. 301–314.
17. Eskenazy G.M. (1999): Aspects of the geochemistry of rare earth elements in coal: an experimental approach. *International Journal of Coal Geology* Vol. 38, s. 285–295.
18. Finkelman R.B. (1994): Modes of occurrence of the potentially hazardous elements in coal levels of confidence. *Fuel Processing Technology* Vol. 39, s. 21–34.

19. Finkelman R.B. i inni (1993): Distribution and mode of occurrence of selenium in US coals. *Environmental Geochemistry and Health* Vol. 15, issue 4, s. 215–227.
20. Hanak B., Kokowska-Pawłowska M., Nowak J. (2011): Pierwiastki śladowe w łupkach węglowych z pokładu 405. *Górnictwo i Geologia* nr 6(4), s. 27–38.
21. Hower J.C., Ruppert L.F., Eble C.F. (1999): Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the Fire Clay coal bed, Eastern Kentucky. *International Journal of Coal Geology* Vol. 39, s. 141–153.
22. Hycnar J. (1987): Metody wydzielenia koncentratów metali z popiołów elektrownianych. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii* nr 19, s. 243–257.
23. Kato Y. i inni (2011): Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience* Vol. 4, s. 535–539.
24. Ketris M.P., Yudovich, Ya E. (2009): Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology* Vol. 78, issue 2, s. 135–148.
25. Molycorp (2011): <http://www.molycorp.com/resources/the-rare-earth-elements>.
26. Parzentny H. (2008): Variability of La, Sc, Th and U contents in bituminous coals of formation in coal basin (LCB). *Transactions of the VSB Technical University of Ostrava Civil Engineering Series* Vol. 2, s. 203–212.
27. Pollock S.M. i inni (2000): Mineralogical and elemental variation of coal from Alberta, Canada: an example from the No. 2 seam, Genesee Mine. *International Journal of Coal Geology* Vol. 43, issues 1–4, s. 259–286.
28. Radwanek-Bąk B. (2011): Zasoby kopalni Polski w aspekcie oceny surowców krytycznych Unii Europejskiej. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* nr 27, s. 5–19.
29. Ren J. i inni (1999): Distribution of arsenic and mercury in Triassic coals from Longtoushan syncline, southwestern Guizhou, P.R. China, *Prospect for coal science in 21st century* Vols 1, 2, s. 153–156.
30. Seredin V.V., Shpirt M.Y. (1995): Metalliferous coals: A new potential source of valuable trace elements as by-products. *Coal Science and Technology* Vol. 24, s. 1649–1652.
31. Seredin V.V. (1996): Rare earth element-bearing coals from the Russian Far East deposits. *International Journal of Coal Geology* Vol. 30, s. 101–129.
32. Smakowski T.J. (2011): Surowce mineralne – krytyczne czy deficytowe dla gospodarki UE i Polski. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* z. 81, s. 59–68.
33. Smółka-Danielowska D. (2007): REE w popiołach lotnych w procesie spalania węgla kamiennego w elektrowniach górnośląskiego okręgu przemysłowego. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* T. 32, s. 190–194.
34. Smółka-Danielowska D. (2010): Rare earth elements in fly ashes created during the coal burning process in certain coal-fired power plants operating in Poland. Upper Silesian Industrial Region. *Journal of Environmental Radioactivity* Vol. 101, issue 11, s. 965–968.
35. U.S. Geological Survey, *Mineral Commodity Summaries*, January 2012.
36. Zhou Y.P., Bohor B.F., Ren Y.L. (2000): Trace element geochemistry of altered volcanic ash layers (tonsteins) in Late Permian coal-bearing formations of eastern Yunnan and western Guizhou Provinces. China. *International Journal of Coal Geology* Vol. 44, issues 3–4, s. 305–324.