

Stan rozpoznania i możliwości pozyskiwania metali strategicznych z polimetalicznych kopalin oceanicznych

Dominik Zawadzki¹



The state of knowledge and possibilities to extract strategic raw materials from the ocean polymetallic deposits.
Prz. Geol., 61: 45–53.

Abstract. The paper presents the characteristics of types, occurrence and distribution of the ocean polymetallic deposits: polymetallic nodules, cobalt-rich ferromanganese crusts, sea-floor massive sulphides and metalliferous clays. Possibility of extraction of critical raw materials (for the EU) and strategic raw materials (according to the OECD report) from the ocean polymetallic deposits is indicated.

Polymetallic nodules are the most recognized type of ocean polymetallic deposits, abundant mostly in abyssal basins at the depths of 3500–6000 m b.s.l. The most important practical metals from the polymetallic nodules are: Fe, Mn (280 000–320 000 ppm), Ni (11 000–14 000 ppm), Co (2100 ppm), Cu (9500–13 000 ppm), Mo and rare

earth elements (REE).

Cobalt-rich ferromanganese crusts, which are laminated ferromanganese clusters occurring at a depth interval between 400–4000 m b.s.l., can have a prospective significance for the extraction of critical raw materials. They are found on the seamounts where seafloor currents have swept the rocky bottom clear of sediment. They contain large amounts of metals: Mn, Co, Ti, Pt, Te, Mo and Zr. The key factor determining the profitability of the crust mining will be cobalt extraction. However, profitability may increase if nickel, tellurium or REE would be recovered at the same time.

The analyses show that the sea-floor massive sulphides would be of great importance, as they are the potential source of gold, platinum, silver, copper, zinc and lead. Extraction of these deposits is associated with the smallest area of exploitation and depth of occurrence (between 1500–3700 m b.s.l.) which can significantly facilitate commencing of mining operations. Their commercial extraction could begin in the next few years, provided a high concentration of gold and metals in the location near the coast, and a depth below 2000 m b.s.l.

Metalliferous clays, which are the deposits enriched in manganese oxides or hydroxides and sulphides or iron, could become an important prospective source of rare earth elements. This is confirmed by a study in two regions: eastern South and central North Pacific. Prospective possibilities of mining the ocean polymetallic deposits increased due to a high concentration of Mn, Ni, Cu, Co, Pt and REE (La, Ce, Nd, Yb, Eu). REE recovery particularly increases the economic value of these deposits. Mining of the ocean polymetallic deposits would meet many technological difficulties and should be preceded by detailed environmental studies.

Keywords: strategic raw materials, ocean polymetallic deposits



Trendy demograficzne, jak też szybki postęp światowej gospodarki przyczyniają się do zwiększonego zapotrzebowania na surowce metaliczne (Abramowski & Kotliński, 2011). W raporcie przygotowanym przez ekspertów Komisji Europejskiej (European Commission, 2010) wskazano 14 surowców „krytycznych” dla państw Unii Europejskiej. Należą do nich antymon, beryl, kobalt, fluoryt, gal, german, grafit, ind, magnez, niob, metale grupy platyny (PGM), pierwiastki ziem rzadkich (REE – *rare earth elements*), tantal oraz wolfram.

Według twórców raportu surowiec otrzymuje miano krytycznego, jeżeli ryzyko związane z brakiem dostaw oraz jego wpływ na gospodarkę są wyższe w porównaniu z wielkością surowców. Podczas klasyfikacji brano pod uwagę kwestie dostępności 41 surowców (stabilność polityczną i gospodarczą krajów dostarczających, wskaźniki recyklingu oraz wielkość produkcji), a także kwestie związane z ochroną przyrody. Grupa ekspertów Komisji Europejskiej przygotowująca wspomniany raport zasugerowała, że lista surowców krytycznych powinna być aktualizowana co 5 lat, co może skutkować jej rozszerzeniem na inne deficytowe minerały i metale.

W raporcie Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development) (Korinek & Kim, 2009) jest stosowane

określenie „surowce strategiczne”, które odnosi się do metali i minerałów stosowanych w zaawansowanych technologiach, jak również w sektorach strategicznych, zwłaszcza w przemyśle zbrojeniowym, występujących w niewielu lokalizacjach na świecie oraz mających niewiele surowców zastępczych. Poza wymienionymi wcześniej metalami i minerałami do surowców strategicznych twórcy raportu OECD zaliczyli również chrom, lit, mangan, molibden, nikiel, ren, krzem, srebro, tytan oraz wanad. Autorzy podkreślają ich wagę dla rozwoju innowacji technologicznych w wielu dziedzinach, w tym także związanych z ochroną środowiska (np. baterie litowe wykorzystywane są m.in. w samochodach hybrydowych, przenośnych komputerach, telefonach komórkowych i kamerach; superstopy renu i kobaltu są niezbędne w przemyśle lotniczym; tellur używany będzie w przyszłości do produkcji fotowoltaicznych ogniw słonecznych oraz części komputerowych).

Podkreślono, że ryzyko braku dostaw niektórych surowców wiąże się z tym, że ich światowa produkcja jest zdominowana przez poszczególne kraje, m.in. Chiny (97% światowej produkcji REE, 91% antymonu, 83% galu, 79% germanu, 75% wolframu), Demokratyczną Republikę Konga (45% kobaltu), Rosję (43% palladu) czy RPA (77% platyny) (Korinek & Kim, 2009).

Pierwiastki ziem rzadkich zaliczono w raporcie OECD do surowców strategicznych. Głównym ich producentem są Chiny (97%), drugie miejsce zajmują Indie (2%),

¹Zakład Geologii Morza, Instytut Nauk o Morzu, Uniwersytet Szczeciński, ul. Mickiewicza 18, 70-383 Szczecin; dominik.zawadzki@univ.szczecin.pl.

a trzecie Brazylii (0,5%). Metale ziem rzadkich obejmują 17 pierwiastków – 15 należących do lantanowców (lantan, cer, prazeodym, samar, neodym, promet, europ, gadolin, terb, dysproz, holm, erb, tul, iterb i lutet) oraz skand i itr. W przemyśle są używane głównie w zaawansowanych technologiach stosowanych do produkcji pojazdów hybrydowych, klimatyzatorów, lamp fluorescencyjnych, ekranów plazmowych, przenośnych komputerów, a także urządzeń elektronicznych. W wyniku ograniczenia przez Chiny eksportu REE w 2013 r. zostanie ponownie otwarta kopalnia Mountain Pass w Kalifornii, dzięki której do lat 90. XX w. USA były głównym producentem ziem rzadkich na świecie. Kopalnię tę zamknięto w 2002 r. z powodu zbyt dużej konkurencji ze strony chińskiej Bayan Obo – największej kopalni REE na świecie.

Do metali grupy platyny jest zaliczanych sześć pierwiastków: platyna, pallad, iryd, rod, ruten oraz osm. Produkcja blisko 93% platyny skupia się w trzech krajach – w RPA, Rosji i Kanadzie. Platyna jest używana w katalizatorach, wyświetlaczach ciekłokrystalicznych, jubilerstwie, elektronice oraz podczas rafinacji ropy naftowej. Przewiduje się, że w ciągu najbliższych lat zwiększy się zastosowanie platyny w takich urządzeniach i dziedzinach jak wodorowe ogniwa paliwowe, czujniki chemiczne oraz przemysł farmaceutyczny (Hein i in., 2010).

W perspektywie kurczących się zasobów złóż lądowych oraz ryzyka ograniczonych dostaw niektórych surowców alternatywnym obiektem zainteresowania stają się oceaniczne złoża kopalin polimetalicznych, które zawierają wiele z wyżej wymienionych metali. Najbardziej perspektywicznymi osadami oceanicznymi są kongregacje polimetaliczne, naskorupienia kobaltońskie i masywne siarczki.

O stale rosnącym zainteresowaniu eksploracją i eksploatacją polimetalicznych kopalin oceanicznych świadczy m.in. fakt, że do Międzynarodowej Organizacji Dna Morskiego (ISA – International Seabed Authority) nadal wpływają nowe wnioski o uzyskanie koncesji na poszukiwania. W 2010 r. rada ISA wydała dwa nowe pozwolenia na prace badawcze nad masywnymi siarczkami – dla chińskiej COMRA (China Ocean Minerals Resources Research and Development Association) i dla Ministerstwa Środowiska i Zasobów Naturalnych Rosji. W maju 2012 r. aplikacje zgłosiło pięciu nowych kontrahentów. Pierwszym z nich był rząd Korei Południowej, który złożył wniosek dotyczący poszukiwań polimetalicznych siarczków w centralnej części Oceanu Indyjskiego (CIOB – Central Indian Ocean Basin). Francuski Instytut Badań Morza (IFREMER – Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer), sponsorowany przez rząd Francji, aplikował o badania masywnych siarczków na Grzbiecie Śród atlantyckim, natomiast brytyjski UK Seabed Resources Ltd., wspierany przez swój rząd oraz rząd Irlandii, wyraził chęć dołączenia do inwestorów pionierskich mających swoje działki we wschodniej części strefy uskokowej Clarion-Clipperton (CCZ – Clarion-Clipperton Fracture Zone). Kolejną aplikującą instytucją było rządowe przedsiębiorstwo Republiki Kiribati – Marawa Research and Exploration Ltd., wnioskujące o rozpoczęcie prac na polu CCZ, w miejscu, gdzie ISA, zgodnie z załącznikiem III do konwencji i umowy z 1994 r., zarezerwowała obszary dla państw rozwijających się. Ostatni wniosek, który wpłynął do komisji prawno-

-technicznej ISA w maju, złożyła belgijska firma G-Tec Sea Minerals Resources NV, finansowana przez rząd Brukseli, wnioskująca również o działkę na polu Clarion-Clipperton. Dnia 23 lipca 2012 r. wszystkie złożone wnioski zostały pozytywnie rozpatrzone. Tym samym liczba umów poszukiwawczych wzrosła do 17. W dniach 27 lipca oraz 3 sierpnia 2012 r. wpłynęły dwa kolejne wnioski dotyczące rozpoczęcia badań naskorupień kobaltońskich na obszarze zachodniego Pacyfiku. Złożyły je chińska COMRA oraz japońskie konsorcjum JOGMEC (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation). Najnowsze wnioski zostaną rozpatrzone na spotkaniu komisji prawno-technicznej ISA w 2013 r.

W niniejszym artykule porównano zawartości metali strategicznych w rozpatrywanych polimetalicznych kopalinach oceanicznych na podstawie najnowszej literatury oraz informacji udostępnionych przez Międzynarodową Organizację Dna Morskiego. Przeprowadzono analizę geologiczno-porównawczą dostępnych danych dotyczących składu mineralnego kongregacji polimetalicznych, naskorupień kobaltońskich, masywnych siarczków i łąk metalonośnych oraz zawartości w nich metali w zależności od warunków oceanograficznych ich rozmieszczenia.

PODZIAŁ OCEANICZNYCH ZŁÓŻ KOPALIN POLIMETALICZNYCH

Zgodnie z aktualnym podziałem oceanicznych złóż kopalin polimetalicznych wyróżnia się cztery główne ich rodzaje: kongregacje polimetaliczne, naskorupienia kobaltońskie, hydrotermalne masywne siarczki i łąki metalonośne (m.in. Depowski i in., 1998; Kotliński, 1999, 2011a; Cronan, 2000; Mizerski & Szamałek, 2009; Abramowski & Kotliński, 2011; Szamałek & Mizerski, 2011).

Ze względu na genezę i warunki występowania Hein i in. (2010) wyróżnili sześć typów omawianych kopalin:

1. Hydrogeniczne naskorupienia żelazowo-manganowe, tworzące twarde pokrywy na skalistym podłożu przemianowanym przez prądy denne; występują one na podmorskich górach, na grzbiecach oraz na równinach w całym oceanie światowym.

2. Hydrotermalne tlenki żelaza wytrącające się na dnie w pobliżu aktywnych wulkanów związanych z płamami gorącą oraz na kredowych górach podmorskich Pacyfiku.

3. Hydrotermalne tlenki manganu występujące na łukach wulkanicznych oraz na podwodnych wulkanach związanych z płamami gorącą.

4. Hydrotermalne siarczki i siarczany oraz osady siarki formujące się w strefach spreadingu, a także w pobliżu najbardziej aktywnych łuków wulkanicznych.

5. Osady fosforytonośne powstające w procesach diagenetycznych na kredowych górach podmorskich centralnego Pacyfiku.

6. Hydrogenetyczne kongregacje żelazowo-manganowe występujące na podmorskich górach.

Dostępne dane uwiarygodniają tezę, że tylko naskorupienia żelazowo-manganowe i polimetaliczne rudy siarczkowe będą w ciągu następnych dekad wydobywane na skalę masową (Hein i in., 2010). Pogląd ten podzielają Abramowski i Kotliński (2011), którzy przedstawiają powierzchnie produktywnych stref wydobywczych dla trzech najważ-

niejszych kopaliny polimetaliczne i wskazują, że rudy siarczkowe zajmują najmniejszą roczną powierzchnię eksploatacyjną, o bokach długości kilkuset metrów. W przypadku naskorupień kobaltonośnych są to pola wielkości kilkunastu kilometrów kwadratowych (np. pole o powierzchni ok. 3×4 km), natomiast w przypadku koncentracji polimetalicznych – 2×10^8 m² (kwadrat o boku ok. 14 km).

KONKRECJE POLIMETALICZNE

Konkrecje polimetaliczne są najlepiej rozpoznanyymi i opisanymi, zarówno w literaturze światowej, jak i krajowej, kopalinami polimetalicznymi (m.in. Andriejew, 1994; Kotliński, 1996, 1999, 2011b; Depowski i in., 1998; Jauhari & Pattan, 2000; Morgan, 2000; Stackelberg, 2000; Mizerski & Szamałek, 2009; International Seabed Authority, 2010; Abramowski & Kotliński, 2011; Szamałek & Mizerski, 2011; Zawadzki & Kotliński, 2011). Tworzą one skupienia koncentrycznie ułożonych, naprzemianległych warstewek tlenków żelaza i manganu oraz minerałów ilastych, stanowiących generacje przyrostu wokół różnego pochodzenia cząstek osadu. Wielkość koncentracji waha się w zakresie 1–20 cm, jednakże najczęściej są spotykane formy mierzące 6–12 cm.

Głównymi minerałami budującymi koncentracje są minerały manganu. Wernadyt dominuje w koncentracjach hydrogeicznych typu H o nieznacznych rozmiarach (do 4 cm), występujących w interwale głębokości 3500–4200 m. Ich powierzchnie są zwykle gładkie, a kształty sferoidalne. Jądrami precypitacji są przeważnie szkliwo wulkaniczne, plagioklasy i zeolity. Wykazują wyższą niż pozostałe typy genetyczne koncentracji zawartość żelaza (103 200 ppm) i kobaltu (2300 ppm), a mniejszą manganu, niklu i miedzi. Na ich powstanie mają wpływ głównie procesy hydrogeiczne, a źródłem metali są wody przydenne. Ten typ koncentracji zalega zwykle na mułach węglanowych i ilach mulistych krzemionkowych lub węglanowych. Wernadyt jest powszechny również w typie koncentracji HD, czyli przejściowym, które zawierają więcej manganu, a mniej kobaltu niż koncentracje typu H i najczęściej spotykane są w przedziale głębokości 4200–4500 m. Todorokit i birnessyt są minerałami dominującymi w dużych (powyżej 6 cm) koncentracjach diagenetycznych typu D, obecnych poniżej 4500 m p.p.m., czyli warstwy CCD. Charakterystyczna jest dla nich silnie urozmaicona lub asymetryczna powierzchnia z wyraźnym pierścieniem, występującym na granicy silnie uwodnionego osadu z wodą przydenną. Mają kształty dyskooidalne i elipsoidalne. Jądrami są przeważnie fragmenty starszych koncentracji lub części organiczne. Względem koncentracji typu H wykazują wyższe zawartości manganu, niklu, miedzi i cynku, niższe zaś REE. Na ich formowanie się mają wpływ przeobrażenia diagenetyczne oraz dostawa składników z wód porowych. Konkrecje typu D przeważnie są pogrążone w ilach mulistych krzemionkowych, mułach ilastych okrzemkowo-radiolariowych i brunatnych ilach pelagicznych (Kotliński & Stoyanova, 2007; International Seabed Authority, 2010; Kotliński, 2011b).

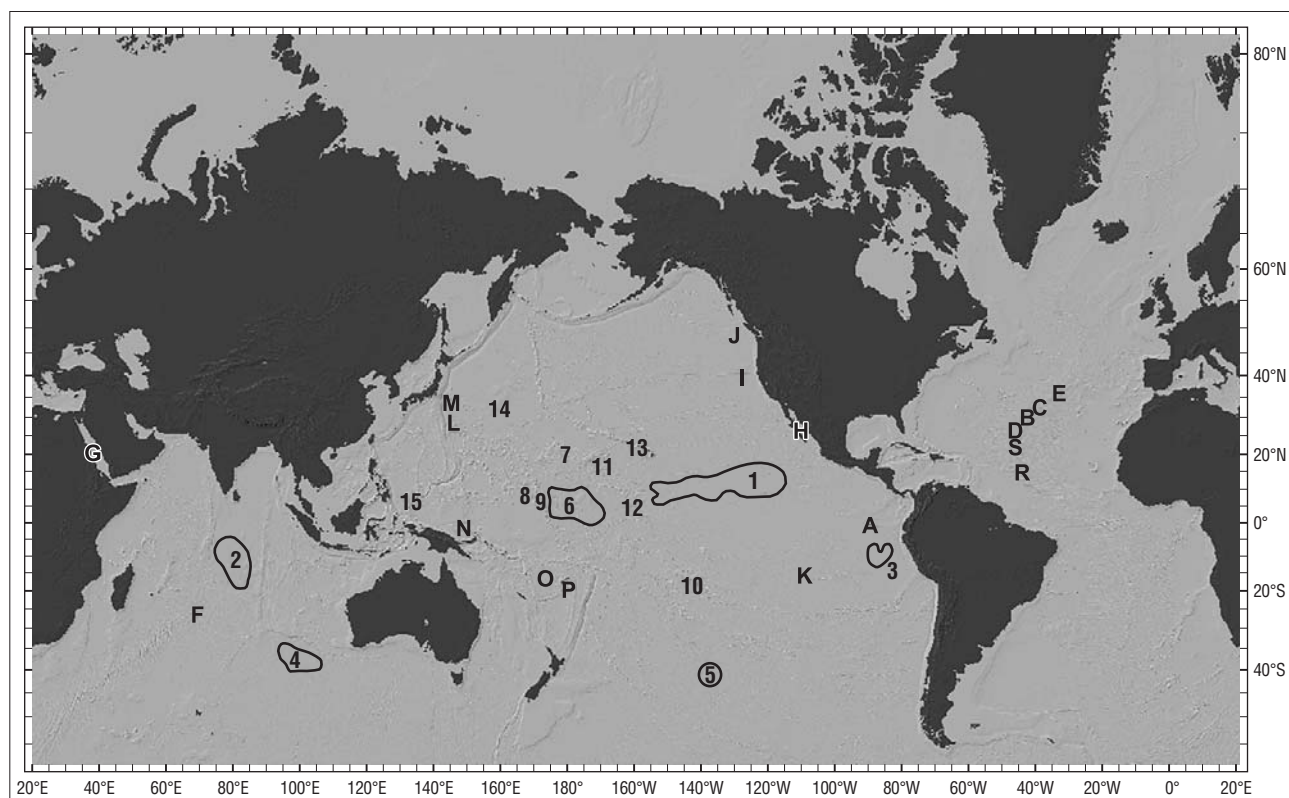
Spośród wszystkich metali, które występują w koncentracjach polimetalicznych, największe znaczenie praktyczne mają żelazo (średnia zawartość 60 000 ppm), mangan (280 000–320 000 ppm), nikiel (11 000–14 000 ppm), kobalt (2100 ppm), miedź (9500–13 000 ppm), molibden

oraz pierwiastki ziem rzadkich (Depowski i in., 1998; Kotliński, 1999, 2011b; Abramowski & Kotliński, 2011; Szamałek & Mizerski, 2011).

Wzrost zainteresowania tlenkowymi skupieniami żelazowo-manganowymi, a zwłaszcza koncentracjami polimetalicznymi, nastąpił w latach 70. XX w. Wyniki intensywne prowadzonych badań o charakterze poszukiwawczo-dokumentacyjnym przyczyniły się do ujawnienia kilku obszarów złożowych, na których zagęszczenie koncentracji wynosi więcej niż 10 kg/m². Wśród nich wyznaczono pola o potencjalnym znaczeniu przemysłowym – najbardziej znane pole koncentracjonalne Clarion-Clipperton oraz Pole Centralnoindyjskie (ryc. 1). Pozostałe obszary są polami perspektywicznymi – wschodnia część Pola Peruwiańskiego, obszar gór północno-zachodniego Pacyfiku (Grzbiet Wake-Necker, Wyspa Magellana), północna część łańcucha wysp Line, archipelag Tuamotu, Wyspy Marshalla, pola Diamantina i Menarda oraz Pole Centralnopacyficzne (Kotliński, 1999; Mizerski & Szamałek, 2009; Abramowski & Kotliński, 2011; Szamałek & Mizerski, 2011; Zawadzki & Kotliński, 2011). Na dwóch najważniejszych polach – CCZ i CIOB – od kilkudziesięciu lat trwają intensywne prace mające na celu dokładne rozpoznanie i oszacowanie zasobów złożowych. Międzynarodowa Organizacja Dna Morskiego przyznała status kontraktorów na polu CCZ następującym krajom: Chiny, Japonia, Korea Południowa, Francja, Rosja, Niemcy, Tonga, Nauru, kontraktorem zostało też InterOceanmetal (konsorcjum w składzie: Bułgaria, Czechy, Kuba, Polska, Rosja i Słowacja). Na polu CIOB, gdzie badania są prowadzone od początku lat 80. XX w., status kontraktora ma rząd Indii.

Konkrecje polimetaliczne pola Clarion-Clipperton zawierają podwyższoną koncentrację metali ziem rzadkich (tab. 1). Dotyczy to zwłaszcza lantanowców (średnia zawartość La = 227,3 ppm). Wysokie zawartości ceru, lantanu, itru i kobaltu są również charakterystyczne dla Grzbietu Wake-Necker (tab. 2). Średnia suma zawartości wszystkich metali ziem rzadkich dla oceanu światowego wynosi 1012,06 ppm. Najwyższe ich koncentracje (za wyjątkiem itru) występują w koncentracjach pochodzących z Oceanu Atlantyckiego (średnio = 1579,94 ppm). Podczas analizy koncentracji metali ziem rzadkich w koncentracjach polimetalicznych zauważono wyraźną korelację liniową między zawartościami REE a ilością żelaza i kobaltu. Wzrost udziału ceru, lantanu, neodymu i itru jest proporcjonalny do wzrostu udziału faz mineralnych wzbogaconych w żelazo, głównie wernadytu (Depowski i in., 1998).

Wyniki najnowszych badań geochemicznych koncentracji polimetalicznych oraz osadów pochodzących z Basenu Centralnoindyjskiego wskazują na znaczne wzbogacenie koncentracji, w stosunku do powiązanych z nimi krzemionkowych i węglanowych mułów, w Mn, Fe, Ti, Mg, P, Ni, Cu, Mo, Zn, Co, Pb, Sr, V, Y, Li i REE. Najwyższa różnica zawartości metali jest notowana w przypadku Mo (ok. 300 razy) oraz Ni, Cu, Zn, Mn, Co oraz Pb (20–120 razy). Czerwone ility pelagiczne odznaczają się relatywnie wysoką zawartością REE, a co za tym idzie różnica między ich koncentracjami w koncentracjach i w osadzie jest niewielka. Autorzy badań tłumaczą to podwyższoną zawartością mikrokonkrecji, smektytu i elementów biogenicznych w ilach pelagicznych (Pattan & Parthiban, 2011).



Ryc. 1. Obszary wybranych wystąpień tlenkowych skupień żelazowo-manganowych (1–6 – konkretne polimetaliczne; 7–15 – naskorupienia kobaltonośne) i masywnych siarczków (A–S). Skala mapy podstawowej wynosi 1 : 40 000 000. 1 – pole Clarion-Clipperton; 2 – Basen Centralnoindyjski; 3 – Basen Peruwiański; 4 – pole Diamantina; 5 – Pole Menarda; 6 – Basen Centralnopacyficzny; 7 – Grzbiet Wake-Necker; 8 – Wyspy Marshalla; 9 – Wyspa Magellana; 10 – archipelag Tuamotu; 11 – wyspa Johnston; 12 – wyspy Line; 13 – Hawaje; 14 – Wyniesienie Szackiego; 15 – Sfederowane Stany Mikronezji i Palau. A – ryft Galapagos; B – pole TAG (geotraverse transatlantycki); C – pole hydrotermalne Broken Spur; D – pole hydrotermalne Snakepit; E – pola hydrotermalne Lucky Strike, Rainbow i Menez Gwen; F – pola hydrotermalne Sonne, Meso i Mt. Jourdanne; G – Głębina Atlantis II; H – Basen Guaymas; I – Niecka Escanaba; J – Grzbiet Explorer; K – Grzbiet Wschodniopacyficzny; L – Niecka Mariańska; M – łuk Izu-Ogasawara; N – wschodni Basen Manus; O – Basen Północnofidżyjski; P – Basen Lau; R – pola hydrotermalne Łogaczew, Siemionow, Aszadzie i Krasnow; S – pola hydrotermalne Puy des Folles i Zienit-Wiktoria

Fig. 1. Location of selected ferro-manganese oxide deposits (1–6 – polymetallic nodules; 7–15 – cobalt-rich ferromanganese crust) and sea-floor massive sulphides (A–S). Scale of basic map is 1 : 40 000 000. 1 – Clarion-Clipperton Field; 2 – Central Indian Ocean Basin; 3 – Peru Basin; 4 – Diamantina Field; 5 – Menard Field; 6 – Central Pacific Basin; 7 – Wake-Necker Ridge; 8 – Marshall Islands; 9 – Magellan Island; 10 – Tuamotu Archipelago; 11 – Johnston Island; 12 – Line Islands; 13 – Hawaiian Islands; 14 – Shatsky Rise; 15 – Federated States of Micronesia and Palau. A – Galapagos Rift Zone; B – TAG (Trans-Atlantic Geotraverse); C – Broken Spur hydrothermal field; D – Snakepit hydrothermal field; E – Lucky Strike, Rainbow and Menez Gwen hydrothermal fields; F – Sonne, Meso and Mt. Jourdanne hydrothermal fields; G – Atlantis II Deep; H – Guaymas Basin; I – Escanaba Trough; J – Explorer Ridge; K – East Pacific Rise; L – Mariana Trough; M – Izu-Ogasawara Arc; N – Eastern Manus Basin; O – North Fiji Basin; P – Lau Basin; R – Logatchev, Semyenov, Ashadze and Krasnov hydrothermal fields; S – Puy des Folles and Zenith-Victory hydrothermal fields

Metody, jakie powinny być zastosowane podczas komercyjnej eksploatacji tych kopalni, ściśle wiążą się z charakterem zalegania konkretnej polimetalicznej na dnie oceanicznym. Ich wydobywanie będzie prowadzone na największej spośród wszystkich polimetalicznych kopalni oceanicznych rocznej powierzchni eksploatacyjnej ($2 \times 10^8 \text{ m}^2$) (Abramowski & Kotliński, 2011). Najprawdopodobniej będzie to skutkowało największą antropopresją wywieraną na głębokowodne ekosystemy oceaniczne, co może stać się bezpośrednim czynnikiem opóźniającym wydobywanie konkretnej na masową skalę.

NASKORUPIENIA KOBALTONOŚNE

Naskorupienia kobaltonośne są warstwowanymi skupieniami żelazowo-manganowymi, występującymi w interwale głębokości 400–4000 m p.p.m., pokrywającymi skaliste dno w miejscach, gdzie przydenne prądy pozbawiają

je pokrywy osadowej. Tworzą one warstwy o miąższości do 25 cm na gujotach, grzbietach i podmorskich wyniesieniach o charakterze tektoniczno-wulkanicznym, powstałe w wyniku procesów hydrogenicznych (wytrącania metali z wody morskiej) oraz łącznego działania procesów hydrogenicznych i hydrotermalnych (w miejscach występowania ekshalacji hydrotermalnych). Proces narastania naskorupień kobaltonośnych jest jednym z najwolniejszych naturalnych procesów na świecie i wynosi 1–6 mm/mln lat (Kotliński, 1999; Hein, 2000; Hein i in., 2000; Mizerski & Szamałek, 2009; Abramowski & Kotliński, 2011; Szamałek & Mizerski, 2011). Największe miąższości notuje się w interwale głębokości 800–1200 m p.p.m., natomiast najmniejsze w zakresie 1200–2500 m p.p.m. W składzie mineralnym naskorupień dominuje amorficzny żelazisty wernadyt ($\delta\text{-MnO}_2$) oraz amorficzny tlenowodorek żelaza – feroksyhit ($\delta\text{-FeOOH}$).

Spośród metali uznanych w raporcie KE za krytyczne podwyższoną zawartość w naskorupieniach wykazują kobalt, niob, wolfram, platyna oraz REE (tab. 3). Średnia zawartość kobaltu waha się w przedziale 5000–10 000 ppm, w wyjątkowych przypadkach osiąga maksimum – 17 000 ppm, wielokrotnie przewyższając koncentrację w litosferze. Metal ten jest używany głównie do wyrobu stali o wysokiej odporności z przeznaczeniem dla branży chirurgicznej, narzędzi tnących i wierzących oraz baterii. Odzysk kobaltu z naskorupień będzie kluczowym czynnikiem determinującym opłacalność ich wydobycia. Dochodowość eksploatacji naskorupień może się jeszcze zwiększyć, pod warunkiem, że przy okazji pozyskania kobaltu odzyskiwane będą inne metale, takie jak nikiel, tellur oraz REE. Zwłaszcza niezwykle wysoka zawartość telluru, którego średnia światowa koncentracja w naskorupieniach wynosi 50 ppm (maksymalnie 206 ppm), jest atrakcyjna dla inwestorów. Tellur jest używany głównie do wyrobu stalowych, miedzianych oraz ołowianych stopów. Obecnie w żadnej kopalni na świecie tellur nie jest podstawowym surowcem wydobyczym, pozyskuje się go głównie jako produkt uboczny przy rafinacji miedzi. Roczna światowa produkcja telluru jest szacowana na 430–480 t. Popyt na ten półmetal może jednak wzrosnąć nawet dwukrotnie, jeżeli sprawdzą się przewidywania dotyczące jego nowych zastosowań w zaawansowanych technologiach. Pozyskanie tego surowca z naskorupień kobaltonośnych wydaje się więc realne (Hein i in., 2010).

Zawartość metali ziem rzadkich w naskorupieniach kobaltonośnych jest bardzo wysoka (średnio jest to 1000–3000 ppm) i wynosi zwykle kilkaset ppm dla itru oraz kilka tysięcy ppm dla sumy wszystkich pozostałych REE. Koncentracja ceru w próbkach naskorupień pochodzących z pobliza Hawajów osiąga nawet 11 000 ppm (2354 ppm ceru w próbkach – tab. 3). Jak donosi Hein (2000), koncentracja trójwartościowych REE (za wyjątkiem ceru) w naskorupieniach wzrasta wraz z głębokością ich występowania. Spośród wszystkich metali ziem rzadkich, w stosunku do ich koncentracji w litosferze, naskorupienia są najbardziej wzbogacone w cer, lantan oraz europ (Hein i in., 2010). Zawartość wolframu w naskorupieniach kobaltonośnych jest wysoka (w porównaniu ze źródłami lądowymi ok. 100 razy wyższa).

Jak dowodzą Goto i in. (2010), oszacowanie rentowności wydobycia naskorupień kobaltonośnych i odzysku z nich metali ziem rzadkich nie jest proste. Dzięki zastosowaniu innowacyjnych metod metalurgicznych wydatki inwestycyjne mogą być obniżone o 87 mln dolarów, natomiast koszty operacyjne o 4 mln dolarów w porównaniu do wcześniejszych wyliczeń kosztów dotyczących zastosowania tradycyjnej metody ługowania. Autorzy wyrażają opinię, że ponieważ zawartość REE w naskorupieniach występujących w północno-zachodnim Pacyfiku jest największa i równa koncentracjom źródeł lądowych, należy przeprowadzić dokładne obliczenia szacunkowe opłacalności pozyskania REE z naskorupień. Jak przedstawił Hein (2000), największe przemysłowe znaczenie będą miały naskorupienia występujące na głębokości nie większej niż 1500 m p.p.m., o miąższości 20–60 mm, przeciętnej zawartości Co wynoszącej powyżej 8000 ppm, gęstości 1,6–2,1 g/cm³ oraz porowatości 43–74%.

Tab. 1. Zawartość metali ziem rzadkich w konkrekcjach polimetalicznych z obszaru badanego przez Interoceanmetal oraz ich średnia koncentracja w oceanie światowym (wg Kotlińskiego i in., 1997)

Table 1. Rare earth elements distribution in polymetallic nodules in the area investigated by Interoceanmetal and their average concentration in the World Ocean (after Kotliński et al., 1997)

Pierwiastek Element	Ilość próbek Number of samples	Minimalna/Minimum [ppm]	Maksymalna/Maximum [ppm]	Średnia/Average [ppm]	Odczylenie standardowe Standard deviation	Średnia dla oceanu światowego Mean for World Ocean [ppm]
La	158	100	460	227,3	56,5	149,4
Ce	158	80	940	392,7	120,3	355,3
Nd	158	80	340	217,3	38,8	154,8
Sm	161	17	67	35,3	8,2	32,3
Eu	62	1	22	10,6	3,3	7,7
Tb	113	0,8	10,3	3,6	1,9	6
Yb	113	1,9	17,4	6,9	2,6	14,5
Lu	113	0,4	3,2	1,4	0,5	2,47

Tab. 2. Koncentracje wybranych surowców krytycznych w konkrekcjach polimetalicznych z najbardziej perspektywicznych pól konkrekcjonosnych (wg Kotlińskiego, 1999)

Table 2. Concentration of the selected critical raw materials in polymetallic nodules from the most prospective fields (after Kotliński, 1999)

Pole konkrekcjonosne Nodule field	Co [ppm]	La [ppm]	Ce [ppm]	Pt [ppm]	Y [ppm]
Pole Clarion-Clipperton Clarion-Clipperton Field	2140	152,99	303,26	0,104	264,16
Basen Centralnoindyjski Central Indian Basin	1410	–	–	0,120	–
Basen Peruwiański Peru Basin	820	35,33	72,18	–	3,07
Grzbiet Wake-Necker Wake-Necker Ridge	4190	280,80	1530,77	0,066	351,94
Pole Menarda Menard Field	3440	100,00	–	–	138,33
Basen Centralnopacyficzny Central Pacific Basin	2370	119,00	552,50	0,085	135,00

Koncentracje metali grupy platyny w naskorupieniach są również wysokie i znacznie przewyższają zawartości w litosferze (z wyłączeniem palladu), a także w konkrekcjach polimetalicznych. Platyna była rozpatrywana jako potencjalny produkt uboczny pozyskania kobaltu z naskorupień, co zwiększyłoby rentowność wydobycia. Większość PGM ma dodatnią korelację między ich koncentracją a grubością naskorupień oraz znajduje się w wewnętrznych częściach pokryw o znacznej miąższości. Koncentracje większości metali grupy platyny zwykle maleją wraz z głębokością. Największe koncentracje platyny są notowane w naskorupieniach z zachodniego i północno-zachodniego Pacyfiku,

Tab. 3. Średnia koncentracja wybranych pierwiastków krytycznych w naskorupieniach kobaltonośnych z wybranych lokalizacji w Pacyfiku i w Oceanie Atlantyckim (wg Heina, 2000)**Table 3.** Average concentration of selected critical elements in the cobalt-rich ferromanganese crust from various locations in the Pacific and Atlantic oceans (after Hein, 2000)

Pierwiastek/Element	Sfederowane Stany Mikronezji i Palau <i>Federated States of Micronesia and Palau</i> n = 35	Wyspy Marshalla/ Marshall Islands n = 116	WM na NW od Wysp Marshalla <i>IW, NW of Marshall Islands</i> n = 43	Wyspa Johnston/ Johnston Island n = 103	Krawędź Kalifornii <i>California Margin</i> n = 71	Głównie WM, NW Pacyfik <i>Mostly IW, NW Pacific</i> n = 1478	Hawaje/ Hawaii n = 182	WM, N Pacyfik <i>IW, far N Pacific</i> n = 6	WM, Wymieszenie Szackiego <i>IW, Shatsky Rise</i> n = 20	WM, SE krawędź Pacyfiku <i>IW, SE Pacific Margin</i> n = 6	WM S Pacyfik 0-25°S <i>IW, SE Pacific 0-25°S Lat.</i> n = 228	WM S Pacyfik >25°S <i>IW, far S Pacific >25°S Lat.</i> n = 51	WM, Atlantyck <i>IW, Atlantic</i> n = 25
	[ppm]												
Co	3991	6410	5019	7441	2746	6372	6904	4349	2713	1918	5508	3878	3574
Nb	54	51	70	48	32	bd	bd	34	43	40	62	bd	54
W	102	88	135	72	69	93,3	bd	120	56	65	110	43	77
Sb	43,3	38,7	49	45,1	44,4	24,4	bd	48,5	43	30,4	40,3	28,5	57,2
Ce	831	1130	1635	1282	985	bd	2354	1570	1742	594	894	868	1430
La	365	293	438	345	294	202	361	323	266	184	256	180	277
Eu	14,5	10	16,1	14	21,4	9,9	18,3	13	13,2	8,3	11,4	39,4	10,4
Pt	0,217	0,489	0,51	0,206	0,069	0,777	0,155	0,157	0,259	0,117	0,286	bd	0,567
Rh	0,015	0,024	0,024	0,019	0,009	bd	0,01	0,01	0,015	0,01	0,02	bd	0,037
Ru	0,019	0,016	0,021	bd	0,006	bd	0,012	0,013	0,012	0,012	0,015	0,012	0,018

WM – wody międzynarodowe, bd – brak danych, n – liczba próbek.
 IM – international waters, bd – no data, n – number of samples.

Tab. 4. Powiązania poszczególnych faz mineralnych występujących w naskorupieniach kobaltonośnych z zawartością pierwiastków (wg Heina, 2000)**Table 4.** Associations of the particular mineral phases elements in cobalt-rich ferromanganese crust (after Hein, 2000)

Faza mineralna <i>Mineral phase</i>	Pierwiastki dominujące <i>Dominant elements</i>	Pierwiastki towarzyszące <i>Less common elements</i>
δ -MnO ₂ (Fe-wernadyt) δ -MnO ₂ (iron-vernadite)	Mn, Co, Ni, Cd, Mo	w 40% badanych regionów: <i>in more than 40%</i> <i>of the investigated regions:</i> Pb, V, Zn, Na, Ca, Sr, Mg, Ti
δ -FeOOH (feroksyhit) δ -FeOOH (feroxyhyte)	Fe, As	bardzo rzadko: <i>less commonly:</i> V, Cu, Pb, Y, P, Cr, Be, Sr, Ti, Ce
Detrytyczna (glinokrzemianowa) <i>Detrital</i> (aluminosilicate)	Si, Al, K	Ti, Cr, Mg, Fe, Na, Cu
CFA (fluoroapatyt węglanowy) <i>CFA (carbonate</i> <i>fluorapatite)</i>	Ca, P, Sr, Y	w niektórych regionach: <i>in some regions:</i> Mo, Ba, Ce, Zn
Biogeniczna rezydualna <i>Residual biogenic</i>	Ba, Sr, Ce, Cu, V, Ca, Mg	w niektórych regionach: <i>in some regions:</i> Fe, As, Na, Mo, Y, P, CO ₂ , Pb, Ti, Ni

podczas gdy centralna i wschodnia część oceanu nie są tak zasobne w ten metal (tab. 3). Bogate w wolfram są zwłaszcza złoża znajdujące się w pobliżu Wysp Marshalla (do 135 ppm w próbie) oraz na obszarze międzynarodowych wód północnego Pacyfiku (120 ppm).

Poza metalami krytycznymi naskorupienia zawierają również duże ilości żelaza (217 000 ppm) i manganu (213 000 ppm), mniejsze zaś miedzi (do 2000 ppm) i niklu (do 6000 ppm).

Pierwiastki w naskorupieniach kobaltonośnych pochodzą z różnych źródeł i są związane z różnymi fazami minerałów (tab. 4). Najbardziej rozpowszechnionym pierwiastkiem w naskorupieniach jest żelazo. Występuje ono porządnie w fazie żelazistego wernadytu i jest głównym składnikiem w fazie feroksyhitu, pojawia się również w składzie minerałów detrytycznych, takich jak pirokseny, amfibole, smektyty, magnetyt i spinele.

Najbardziej perspektywicznymi obszarami pozyskiwania metali krytycznych z naskorupień kobaltonośnych są góry i góry podmorskie północno-zachodniego Pacyfiku, a w szczególności wyłączne strefy ekonomiczne Hawajów, wyspy Johnston oraz Wysp Marshalla. Średnie koncentracje kobaltu w tych regionach znacznie przekraczają 6000 ppm, a zawartości platynowców na obszarze Wysp Marshalla są jednymi z najwyższych ze wszystkich analizowanych obszarów.

Eksploatacja naskorupień kobaltońskich będzie prowadzona na rocznej powierzchni eksploatacji rzędu kilkunastu kilometrów kwadratowych. Największym wyzwaniem dla górnictwa morskiego stanie się w tym przypadku opracowanie efektywnej metody odspajania najbardziej produktywnej warstwy naskorupień (60–80 mm) od skał podłoża (Hein, 2000; Abramowski & Kotliński, 2011; Szamałek & Mizerski, 2011).

HYDROTHERMALNE MASYWNE SIARCZKI

Powstawanie i występowanie polimetalicznych masywnych siarczków jest powiązane ze strefami podwyższonego strumienia ciepła aktywnego wulkanizmu w rejonach formowania się nowej skorupy oceanicznej. Masywne siarczki są obecne zarówno w pobliżu dywergentnych, jak i konwergentnych granic płyt litosfery. Formowanie tych osadów jest bezpośrednio związane z ekshalacjami roztworów hydrotermalnych krążących w spēkaniach i porach skał tworzących dno oceaniczne i ługujących z nich pierwiastki, które następnie są osadzane w postaci czarnych kominów (Kotliński, 1999; Herzig & Hannington, 2000; Herzig i in., 2002; Abramowski & Kotliński, 2011; Szamałek & Mizerski, 2011).

Hydrotermalne masywne siarczki zostały odkryte najpóźniej spośród wszystkich polimetalicznych kopaliny oceanicznych. Pierwsze doniesienia o wysokotemperaturowych czarnych kominach pojawiły się w 1979 r., tuż po rejsie badawczym batyskafu Alvin, który eksplorował dno Pacyfiku w pobliżu wysp Galapagos. Następne lata przyniosły odkrycia na Oceanie Atlantyckim (jeden z najistotniejszych obszarów występowania, czyli TAG – Trans-Atlantic Geotraverse/ geotraverse transatlantycki, pola Broken Spur, Snakepit, Lucky Strike, Rainbow, Menez Gwen), i Oceanie Indyjskim (pola Sonne, Meso, Mt. Jourdanne), jak również na Morzu Śródziemnym (pole Palinuro) i Morzu Czerwonym (Głębia Atlantis II). Przez ponad 30 lat poszukiwań nowych miejsc występowania masywnych rud siarczkowych ujawniono przeszło 100 lokalizacji czarnych kominów. Zdecydowana ich większość znajduje się w Pacyfiku (Basen Guaymas, ryft Galapagos, Niecka Escanaba, Grzbiet Explorer, Grzbiet Wschodniopacyficzny, łuk Izu-Ogasawara, Niecka Mariańska, Wschodni Basen Manus, Basen Północnofidżyjski, Basen Lau) (<http://www.isa.org/jm/en/home>).

Głębokość występowania hydrotermalnych masywnych siarczków waha się od 80 m w przypadku góry Panarea zlokalizowanej na Morzu Tyrreńskim do ponad 3675 m w pobliżu czynnych kominów Rowu Mariańskiego.

Skład mineralogiczny i chemiczny masywnych siarczków jest bardzo zróżnicowany i ściśle związany z rodzajem podłoża wulkanicznego, na którym się one tworzą. Dojrzałe łuki wulkaniczne, takie jak w Basenie Północnofidżyjskim i w pobliżu Rowu Mariańskiego, są zdominowane przez bazalty, co powoduje, że występujące tam osady są podobne do osadów tworzących się w strefach osiowych rozrostu grzbietów oceanicznych (TAG, Grzbiet Śródatlantycki). W porównaniu do dojrzałych łuków młode łuki wulkaniczne (południowy Basen Lau, Rów Okinawy, zachodnia część Basenu Manus) mają bardziej zróżnicowany skład petrograficzny, w który wchodzi bazalty, andezyty, dacyty oraz ryodacyty. Skutkuje to podwyższonymi

Tab 5. Skład chemiczny hydrotermalnych masywnych siarczków (Herzig i in., 2002)

Table 5. Chemical composition of sea-floor massive sulphides (Herzig et al., 2002)

Pierwiastek <i>Element</i>	Wewnątrzoceaniczne grzbiety łuków wulkanicznych <i>Intraoceanic back-arc ridges</i>	Wewnątrzkontynentalne grzbiety łuków wulkanicznych <i>Intracontinental back-arc ridges</i>	Grzbiety śródoceaniczne <i>Mid-ocean ridges</i>
[ppm]			
Pb	4000	118 000	1000
Fe	130 000	62 000	264 000
Zn	165 000	202 000	85 000
Cu*	40 000	33 000	48 000
Ba	126 000	72 000	18 000
As	845	17 500	235
Sb**	106	6710	46
Ag*	217	2304	113
Au	4,5	3,1	1,2

*Uznane w raporcie Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju za minerały i metale strategiczne. **Uznane w raporcie Komisji Europejskiej za surowiec krytyczny dla Unii Europejskiej.

*Strategic raw materials according to the Organisation for Economic Co-operation and Development report. **Critical raw materials for the European Union according to the European Commission report.

koncentracjami Zn, Pb, Ba i Au w powstających tam masywnych siarczkach (tab. 5).

Analizując tabelę 5 oraz bazę danych Międzynarodowej Organizacji Dna Morskiego, można wnioskować, że spośród surowców uznanych w raporcie Komisji Europejskiej za krytyczne dla Unii Europejskiej najistotniejszym pierwiastkiem w masywnych siarczkach jest antymon. Z dostępnych danych ISA wynika, że jego największa koncentracja występuje w obszarze Rowu Okinawy.

Skład mineralogiczny masywnych siarczków jest bezpośrednio związany z temperaturą roztworów hydrotermalnych oraz z miejscem wytrącania. W miejscach ekshalacji fluidów wysokotemperaturowych i w wewnętrznych kanałach czarnych kominów obecne są piryty, chalkopiryty, pirotyn, kubanit oraz bornit. W zewnętrznych partiach niskotemperaturowych białych kominów występują piryty, markasyt, sfaleryt oraz wuycyt. Z minerałów niemetalicznych w masywnych siarczkach odnotowuje się gips, baryt i anhydryt, który jako minerał wysokotemperaturowy jest zastępowany siarczkami, krzemianami i barytem w warunkach niskotemperaturowych (Herzig i in., 2002; Szamałek i in., 2011).

Obecnie badania polimetalicznych masywnych siarczków skupiają się na ujawnieniu nowych perspektywicznych obszarów występowania i na jeszcze dokładniejszym rozpoznaniu składu mineralogicznego i chemicznego. Zagadnieniem tym zajęli się Szamałek i in. (2011), którzy opublikowali wyniki pierwszych w Polsce mineralogicznych badań masywnych siarczków pochodzących ze strefy ryftowej

Galapagos. Wyniki analizy pobranych próbek wykazały znaczące koncentracje złota (do 7,24 ppm), co pozwala zaliczyć masywne siarczki z powyższego rejonu do osadów o wysokiej zawartości tego pierwiastka, a tym samym sprawia, że obszar prawdopodobnie nadal będzie eksplorowany. Drugim metalem występującym w podwyższonej ilości jest platyna (do 0,35 ppm). Tak wysoka jej zawartość sprawia, że próbki ze strefy ryftowej Galapagos wykazują jedną z najwyższych koncentracji tego metalu spośród obecnie znanych oceanicznych rud siarczkowych. Jest to istotne tym bardziej, że ujawnione do tej pory koncentracje PGM w masywnych siarczках były niewielkie i zwykle nie przekraczały kilku ppb.

Poszukiwania polimetalicznych rud siarczkowych doprowadziły w ostatnich latach do kolejnych odkryć. Cherkashov i in. (2010) opisali dwa nowo odkryte obszary występowania hydrotermalnych masywnych siarczków w obrębie Grzbietu Śród atlantyckiego – pola Siemionow i Zienit-Wiktoria – oraz zwiększenie powierzchni (w stosunku do pierwotnie zakładanej) znanego już pola hydrotermalnego Puy des Folles. Wszystkie obszary znajdują się w północno-równikowej części Grzbietu Śród atlantyckiego, w pobliżu odkrytych w latach 2003–2004 pól Aszadzkie i Krasnow oraz jednego z najbardziej perspektywicznych – Łogaczow. Cherkashov i in. (2010) wskazali obszar Siemionow jako niezwykle zasobny w złoto. Maksymalna koncentracja tego pierwiastka wynosi aż 188,2 ppm, co powoduje, że rejon ten może być jednym z najbardziej złotonośnych spośród wszystkich znanych miejsc zalegania rudy siarczkowej.

Komercyjne pozyskiwanie hydrotermalnych masywnych siarczków może rozpocząć się w ciągu następnych kilkunastu lat, pod pewnymi warunkami, tj. wysokiej koncentracji złota i metali nieszlachetnych w rudzie oraz – w przypadku lokalizacji występujących blisko wybrzeża, w wyłącznych strefach ekonomicznych – jeżeli głębokości wydobywania nie będą przekraczały 2000 m (Herzig i in., 2002). Przewiduje się, że pierwsza eksploatacja masywnych siarczków będzie prowadzona na obszarze podmorskiej góry Conical, która znajduje się na Pacyfiku, w wyłącznej strefie ekonomicznej Papui-Nowej Gwinei. Argumentami potwierdzającymi ten scenariusz są wysoka koncentracja złota, bliskość ładu oraz stosunkowo niewielka głębokość oceanu, nieprzekraczająca 2000 m (Mizerski & Szamałek, 2009). Ułatwieniem w pozyskiwaniu surowców z polimetalicznych siarczków może być fakt, że zalegają one na stosunkowo niewielkich powierzchniach, co sprawia, że system wydobywczy może być praktycznie stacjonarny, a roczna powierzchnia eksploatacyjna nie przekroczy 1 km² (Abramowski & Kotliński, 2011).

ILY METALONOŚNE

Iły metalonośne są perspektywicznymi polimetalicznymi kopalinami oceanicznymi, które występują w postaci niezlityfikowanych skał wzbogaconych w tlenki manganu lub wodorotlenki i siarczki żelaza o sumarycznej zawartości Fe i Mn powyżej 100 000 ppm. Formują się na skutek podmorskiej aktywności wulkanicznej i hydrotermalnej. Największe zasoby tych kopalin występują na Pacyfiku. Średnie koncentracje żelaza w iłach metalonośnych wynoszą

do 195 000 ppm, manganu – do 58 000 ppm (Depowski i in., 1998; Mizerski & Szamałek, 2009).

Jak dowodzą najnowsze badania składu chemicznego ponad 2000 próbek poszczególnych typów osadów oceanicznych (głównie osadów metalonośnych, iłów zeolitowych oraz czerwonych iłów pelagicznych) z 78 lokalizacji na Oceanie Spokojnym (Kato i in., 2011), iły metalonośne zalegające na dnie Pacyfiku mogą stać się ważnym perspektywicznym źródłem metali ziem rzadkich. W wyniku szczegółowych badań ujawniono znacznie podwyższone koncentracje REY (*rare-earth elements and yttrium* – pierwiastki ziem rzadkich i itru) w dwóch regionach: we wschodniej części południowego oraz w centralnej części północnego Pacyfiku. Zawartość REY w pierwszym obszarze (5–20°S, 90–150°W) waha się między 1000 ppm a 2230 ppm, co jest wynikiem porównywalnym do koncentracji tych metali w lądowych złożach południowochińskich. Koncentracje REY z północnego Pacyfiku (na wschód i zachód od Hawajów: 3–20°N, 130°W–170°E) są umiarkowane i wynoszą od 400 ppm do 1000 ppm. Poza pierwiastkami ziem rzadkich oraz itrem iły metalonośne zawierają podwyższone ilości wanadu, kobaltu, niklu, miedzi, cynku, molibdenu oraz manganu.

Na obniżenie koncentracji ziem rzadkich oraz itru w iłach metalonośnych wpływają m.in. dopływ materiału teryogenicznego z kontynentów (przykład obszaru północno-wschodniego Pacyfiku – na wschód od Grzbietu Juan de Fuca) oraz szybkie tempo sedimentacji mułów krzemionkowych (radiolarytowych) i węglanowych (obszary podrównikowe lub występujące w bezpośredniej bliskości grzbietów śródoceanicznych).

WNIOSKI

Z analizy dostępnych danych wynika, że spośród polimetalicznych kopalin oceanicznych najlepiej poznane są konkretne polimetaliczne. Masywne siarczki, naskorupienia kobaltonośne oraz iły metalonośne nadal wymagają wnikliwych badań, szczególnie dotyczących ich występowania, genezy oraz prawidłowości rozmieszczenia. Obecny stan wiedzy pozwala stwierdzić, że zdecydowanie największa liczba perspektywicznych obszarów wydobywczych znajduje się na Pacyfiku (pola: Clarion-Clipperton, Peruwiańskie i Centralnopacyficzne, Grzbiet Wake-Necker, wyłączne strefy ekonomiczne Wysp Marshalla, wyspy Johnston i Hawajów, a także ryft Galapagos, Basen Manus czy Rów Okinawy). Należy jednak pamiętać, że do tej pory tylko niewielki obszar oceanów został dokładnie poznany, skartowany i opróbowany. Oszacowano, że spośród 50 000 podmorskich gór Pacyfiku dokładnie poznano zaledwie 10%.

Surowce strategiczne, których wykorzystanie ma kluczowe znaczenie dla rozwoju światowej gospodarki, są zawarte w kopalinach oceanicznych. Masywne siarczki, które najprawdopodobniej wydobywane będą w pierwszej kolejności, stanowią potencjalne źródło pozyskania kobaltu, złota, srebra platyny i miedzi. Naskorupienia kobaltonośne, których wydobywanie napotka wiele trudności technologicznych związanych z odspojeniem urobku od skał podłoża, wykazują podwyższoną koncentrację telluru, manganu, kobaltu, molibdenu, platyny i pierwiastków ziem rzadkich. Z konkretnej polimetalicznej będą pozyskiwane

żelazo, mangan, nikiel, kobalt, miedź, molibden, a także REE. Iły metalonośne wykazują podwyższone zawartości REE, wanadu, kobaltu, niklu, miedzi, cynku, molibdenu i manganu.

Przed rozpoczęciem eksploatacji wszystkich wymienionych rodzajów polimetalicznych kopalni oceanicznych niezbędne jest przeprowadzenie szczegółowych badań środowiskowych i wpływu wydobycia surowców na ekosystemy oceaniczne, w tym na organizmy związane ze środowiskiem podmorskich gór, basenów abysalnych czy wykorzystujące chemosyntezę do swoich procesów życiowych. Stworzenie spójnego planu zagospodarowania środowiska oceanicznego w miejscach występowania surowców głębokomorskich i w ich pobliżu jest obecnie jednym z nadrzędnych celów polityki Międzynarodowej Organizacji Dna Morskiego. Temu zagadnieniu poświęcone były warsztaty zorganizowane przez ISA w 2011 r., których podsumowanie opublikowano w 10. tomie ISA Technical Study (International Seabed Authority, 2011).

Badania wykonano w ramach działalności statutowej Zakładu Geologii Morza Instytutu Nauk o Morzu Uniwersytetu Szczecińskiego. Autor pragnie podziękować prof. dr. hab. Ryszardowi Kotlińskiemu za konsultacje i pomoc w przygotowaniu artykułu.

LITERATURA

- ABRAMOWSKI T. & KOTLIŃSKI R.A. 2011 – Współczesne wyzwania eksploatacji oceanicznych kopalni polimetalicznych. *Górn. Geoinż.*, 35: 41–62.
- ANDRIEJEV S.I. 1994 – Mietałlogienija żelozomargancowych obrazowanij Mirowogo okieana. Sankt-Pietierburg, Nedra: 1–191.
- CHEKASHOV G., POROSHINA I., STEPANOVA T., IVANOV V., BEL'TENEV V., LAZAREVA L., ROZHDESTVENSKAYA I., SAMOVAROV M., SHILOV V., GLASBY G.P., FOUQUET Y. & KUZNETSOV V. 2010 – Seafloor massive sulfides from the Northern Equatorial Mid-Atlantic Ridge: new discoveries and perspectives. *Mar. Georesour. Geotechnol.*, 28: 222–239.
- CRONAN D.S. (red.) 2000 – Handbook of marine mineral deposits. CRC Press, London: 239–272.
- DEPOWSKI S., KOTLIŃSKI R., RÜHLE E. & SZAMAŁEK K. 1998 – Surowce mineralne mórz i oceanów. Wyd. Nauk. Scholar, Warszawa.
- EUROPEAN Commission 2010 – Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf].
- GOTO K., YAMAZAKI T., NAKATANI N. & ARAI R. 2010 – Preliminary economic feasibility analysis of cobalt-rich manganese crust mining for rare metal recovery. 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 3. ASME, New York: 29–34.
- HEIN J. 2000 – Cobalt-rich ferromanganese crusts: global distribution, composition, origin and research activities. [W:] Polymetallic massive sulphides and cobalt-rich ferromanganese crusts: status and prospects. ISA Tech. Stud., 2: 37–77.
- HEIN J.R., CONRAD T.A. & STAUDIGEL H. 2010 – Seamount mineral deposits: a source of rare metals for high-technology industries. *Oceanography*, 23: 184–189.
- HEIN J.R., KOSCHINSKY A., BAU M., MANHEIM F.T., KANG J.-K. & ROBERTS L. 2000 – Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific. [W:] Cronan D. (red.) Handbook of marine mineral deposits. CRC Press, London: 239–272.
- HERZIG P.M. & HANNINGTON M.D. 2000 – Polymetallic massive sulfides and gold mineralization at mid-ocean ridges and subduction-related environments. [W:] Cronan D. (red.) Handbook of marine mineral deposits. CRC Press, London: 347–363.
- HERZIG P.M., PETERSEN S., HANNINGTON M.D. 2002 – Polymetallic massive sulphide deposits at the modern seafloor and their resource potential. [W:] Polymetallic massive sulphides and cobalt-rich ferromanganese crusts: status and prospects. ISA Tech. Stud., 2: 7–37.
- International Seabed Authority 2010 – A geological model of polymetallic nodule deposits in the Clarion-Clipperton Fracture Zone. Report of International Seabed Authority. ISA Tech. Stud., 6: 6–23.
- International Seabed Authority 2011 – Environmental management needs for exploration and exploitation of deep sea minerals. Report of a workshop held by the International Seabed Authority in collaboration with the Government of Fiji and the SOPAC Division of the Secretariat of the Pacific Community (SPC) in Nadi, Fiji, from 29 November to 2 December. 2011. ISA Tech. Stud., 10: 12–15.
- JAUHARI P. & PATTAN J.N. 2000 – Ferromanganese nodules from the Central Indian Ocean Basin. [W:] Cronan D. (red.) Handbook of marine mineral deposits. CRC Press, London: 171–195.
- KATO Y., FUJINAGA K., NAKAMURA K., TAKAYA Y., KITAMURA K., OHTA J., TODA R., NAKASHIMA T. & IWAMORI H. 2011 – Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geosci.*, 4: 535–539.
- KORINEK J. & KIM J. (red.) 2009 – Export restrictions on strategic raw materials and their impact on trade and global supply. 2009 Workshop on Raw Materials. OECD Headquarters, Paris [<http://www.oecd.org/trade/non-tariffmeasures/43934153.pdf>].
- KOTLIŃSKI R. 1996 – Morphogenetic types of polymetallic nodules in the Clarion-Clipperton Ore Field. International Seminar on Deep Sea-Bed Mining Technology, 18–20 October, 1996. COMRA, Beijing, China: 1–11.
- KOTLIŃSKI R. 1999 – Metallogenesis of the world's ocean against the background of ocean crust evolution. *Pol. Geol. Inst. Spec. Pap.*, 4: 25–49.
- KOTLIŃSKI R. 2011a – Mapa osadów oceanicznych w skali 1 : 40 000 000. IOM, Szczecin.
- KOTLIŃSKI R. 2011b – Pole koncentracji Clarion-Clipperton – źródło surowców w przyszłości. *Górn. Geoinż.*, 35: 195–214.
- KOTLIŃSKI R., PARIZEK A. & REZEK K. 1997 – Polymetallic nodules – a possible source of Rare Earth Elements. [W:] Chung J.S. & Hong S. (red.) The proceedings of the second (1997) ISOPE Ocean Mining Symposium, Seoul, Korea, November 24–26, 1997. ISOPE, Colorado, USA: 50–56.
- KOTLIŃSKI R. & STOYANOVA V. 2007 – Buried and surface polymetallic nodule distribution in the eastern Clarion-Clipperton Zone. Main distinctions and similarities. *Adv. Geosci.*, 9: 67–74.
- MIZERSKI W. & SZAMAŁEK K. 2009 – Geologia i surowce mineralne oceanów. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa: 1–360.
- MORGAN C.H.L. 2000 – Resource estimates of the Clarion-Clipperton manganese nodule deposits. [W:] Cronan D. (red.) Handbook of marine mineral deposits. CRC Press, London: 145–170.
- PATTAN J.N. & PARTHIBAN G. 2011 – Geochemistry of ferromanganese nodule-sediment pairs from Central Indian Ocean Basin. *J. Asian Earth Sci.*, 40: 569–580.
- STACKELBERG U. 2000 – Manganese nodules of the Peru Basin. [W:] Cronan D. (red.) Handbook of marine mineral deposits. CRC Press, London: 197–238.
- SZAMAŁEK K., MARCINOWSKA A., NEJBERT K. & SPECZIK S. 2011 – Sea-floor massive sulphides from the Galápagos Rift Zone – mineralogy, geochemistry and economic importance. *Geol. Quart.*, 55: 187–202.
- SZAMAŁEK K. & MIZERSKI W. 2011 – Surowce mineralne z dna mórz i oceanów – stan rozpoznania i perspektywy. *Górn. Geoinż.*, 35: 353–369.
- ZAWADZKI D. & KOTLIŃSKI R.A. 2011 – Uwarunkowania występowania i rozmieszczenia perspektywicznych nagromadzeń tlenkowych skupień żelazowo-manganowych. *Górn. Geoinż.*, 35: 427–439.
- <http://www.isa.org/jm/en/home>.

Praca wpłynęła do redakcji 28.06.2012 r.
Po recenzji akceptowano do druku 29.10.2012 r.