

Stan rozpoznania oceanicznych zasobów mineralnych

Krzysztof Szamalek¹



The state of knowledge concerning on oceanic mineral resources. *Prz. Geol.*, 66: 189–194.

Abstract. For the past 50 years, Poland has been actively involved in the research on marine mineral resources. Since 1987, research cruises and documentation of the polymetallic concretions (Fe-Mn) in the Clarion-Clipperton Zone on the Pacific seabed have been performed as part of the Interoceanmetal project. In 2016, the IOM presented a report to the ISA on the past research and new technologies for processing concretions, together with an economic analysis regarding the process of development of concretion deposits. In 2018, ISA granted Poland the right to search for polymetallic sulphides in the Atlantic Ocean. At the same time, a government project called P_{Ro}GEO was launched to encourage the reconnaissance search for marine minerals. This opens a new chapter in the history of Polish participation in the search for marine mineral deposits. Poland is an active participant in international organization, created based on the Convention on the Law of the Sea. Initially, Polish involvement was limited to legal matters, and then extended to geology of the sea and marine mineral deposits. A more active role of Poland in marine exploration during the last years requests to familiar Polish geologists with the current stage of knowledge about marine resources. The current state of knowledge of marine mineral deposits, though still requiring further research, is sufficient to plan their development in the near future. This paper argues that the deposits of polymetallic sulphides, Co-rich crust, gas hydrates and polymetallic concretions will likely be developed first.

Keywords: marine mining, marine mineral resources, Fe-Mn nodules, Co-rich crust, massive sulphides

Mimo upływu blisko 150 lat od pierwszego rejsu badawczego okrętu *HMS Challenger* (1872–1876) i późniejszych intensywnych międzynarodowych badań zasoby mineralne oceanu wciąż pozostają nie do końca rozpoznane. Kolejny wzrost cen surowców metalicznych na rynkach światowych w ostatnich kilku latach oraz wyczerpywanie się zasobów złóż lądowych wzmagają zainteresowanie możliwościami zagospodarowania złóż kopalin oceanicznych. Poza już eksploatowanymi surowcami, takimi jak: ropa naftowa, gaz ziemny, okruczowe złoża minerałów ciężkich, złoto, diamenty, fosforyty, żwiry i piaski, ekonomiczne znaczenie mogą mieć gazohydraty jako źródło metanu, a także metale, zwłaszcza występujące w konkrekcjach polimetalicznych, naskorupieniach kobaltonośnych, polimetalicznych siarczokach hydrotermalnych i mułach metalonośnych. Czas podjęcia eksploatacji nowych złóż oceanicznych wydaje się być nieodległy, albowiem obecnie już 29 kontraktorów *International Seabed Authority* (ISA), do niedawna nazywanych inwestorami pionierskimi, prowadzi poszukiwania, rozpoznawanie i przygotowania do eksploatacji złóż konkrekcji polimetalicznych (17 na Pacyfiku i Oceanie Indyjskim), siarczoków hydrotermalnych (3 na Atlantyku i 4 na Oceanie Indyjskim) oraz naskorupień kobaltonośnych (4 na Pacyfiku, 1 na Atlantyku).

Kontrakty z ISA dotyczą badań dna pod wodami oceanicznymi poza jurysdykcją krajów nadbrzeżnych (Jędrysek, 2008). Polska od 1987 r. uczestniczy w badaniach oceanicznych surowców mineralnych, szczególnie konkrekcji polimetalicznych na Pacyfiku w ramach udziału w międzyrządowej organizacji Interoceanmetal (IOM). A 12 lutego 2018 r. podpisała kontrakt z ISA, zezwalający naszemu krajowi na poszukiwanie złóż siarczoków polimetalicznych na Atlantyku. Wsparcie rozwoju badań oceanicznych ma zapewnić rządowy program P_{Ro}GEO (Uchwała, 2017; Zarządzenie, 2017). Stwarza to potrzebę przekazania polskiemu środowisku geologicznemu wiedzy o aktualnym stanie rozpoznania kopalin oceanicznych oraz przygotowania technologicznego, środowiskowego, praw-

nego i politycznego, a także zaawansowania do rozpoczęcia eksploatacji przemysłowej kopalin oceanicznych.

BADANIA GEOLOGICZNE OCEANÓW

Wiek XX, a zwłaszcza jego druga połowa, był okresem niezwykle szeroko zakrojonych badań budowy geologicznej podłoża dna oceanicznego oraz określania miejsc występowania w nim wielu utworów mogących mieć znaczenie surowcowe, a także ich rodzaju i genezy. Były to przede wszystkim międzynarodowe projekty głębokich wierceń *MOHOLE*, *Deep Sea Drilling Project* (DSDP), *International Programme of Ocean Drilling* (IPOD), *Integrated Ocean Drilling Programme* (IODP), ale także wcześniejsze badania osadów dna oceanicznego, np. *Intermorgeo* (Kotliński, Szamalek, 1998). Wyniki tych badań umożliwiły sformułowanie wielu nowych hipotez dotyczących genezy i ewolucji oceanów, jak i powstawania kopalin – opracowano m.in. mapę morfogenetyczną dna oceanu światowego. Jednak zasadniczego celu, jakim miało być przewiercenie skał skorupy oceanicznej i pobranie próbek skał z płaszczu Ziemi, nie osiągnięto. Supergłęboki otwór na płw. Kola, wykonany przez Rosjan do głębokości 12 262 m, nie dotarł do skał górnego płaszczu Ziemi. Także wiercenia wykonane w ostatnich kilku latach nie przebiły się przez skorupę oceaniczną. W 2012 r. w ramach projektu IODP ze statku *Joides Resolution* wykonano wiercenie w rejonie ryftu Hess Deep na Pacyfiku (https://iodp.tamu.edu/science-ops/expeditions/hess_deep.html). Jest to miejsce na styku trzech płyt oceanicznych – pacyficznej, kokosowej i Nasca, w którym występuje tzw. okno tektoniczne i pokrywa osadowa wraz z warstwą skorupy mają zaledwie ok. 6 km miąższości. Jednak i tam nie osiągnięto do płaszczu Ziemi. Współcześnie jest realizowany program IODP, którego elementem jest projekt SloMo, mający na celu przewiercenie skorupy oceanicznej i dotarcie do górnego płaszczu Ziemi w rejonie grzbietu Atlantis na Oceanie Indyjskim (Ciążela i in., 2016). Wiercenie zlokalizowano w pasie dna

¹ Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; krzysztof.szamalek@uw.edu.pl.

oceanu o wolnym spreadingu, w miejscu wychodni skał dolnej skorupy oceanicznej (*ocean core complexes* – OCC). Do tej pory na dnie oceanu rozpoznano ponad 170 miejsc o takiej budowie geologicznej (Ciazela i in., 2015). W rejonie tym już wcześniej wykonano dwa wiercenia. Zdobyte wówczas materiały i doświadczenia będą pomocne w realizacji pierwszego etapu wiercenia, planowanego na lata 2018–2019, mającego osiągnąć głębokość 2,3 tys. m. Celem drugiego etapu, planowanego na lata 2020–2025, jest pogłębienie otworu wiertniczego do 6 tys. m z japońskiego statku badawczego Chikyu.

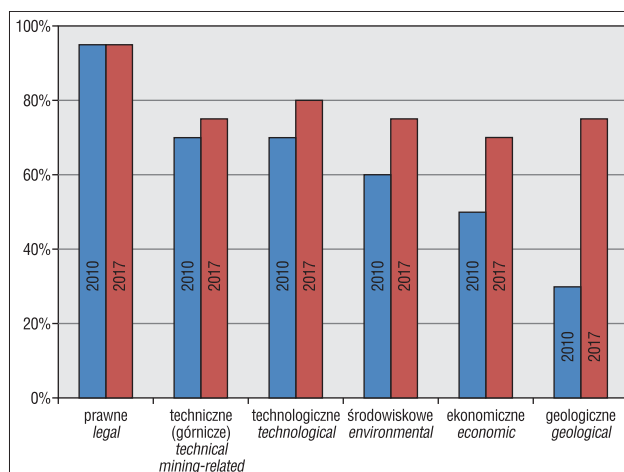
Zakres badań realizowanych przez kontraktorów ISA jest imponujący a dotyczą one wszystkich oceanów świata. Ponadto duże i liczne programy badawcze są realizowane przez amerykańską NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Obszar badawczy, jakim jest ocean światowy, jest jednak tak wielki, że wyniki dotychczasowych badań nie doprowadziły jeszcze do pełnego rozpoznania jego budowy, struktury i zasobów. Wiedza ta jest wciąż uzupełniania, gdyż nadal są odkrywane nowe struktury i procesy, zarówno małe, jak i duże. Na przykład w 2013 r. na podstawie wyników badań realizowanych w ramach IODP, m.in. wykonanych podczas *Expedition 324* w 2009 r., a także danych sejsmicznych zebranych w trakcie wypraw R/V Marcus G. Langseth w 2010 i 2012 r., potwierdzono odkrycie największego wulkanu znanego do tej pory na Ziemi (Sager i in., 2013). Wulkan ten znajduje się w masywie Tamu na Pacyfiku. Tworzy bardzo połą strukturę i przez to słabo rozróżnialną. Ma ok. 500 km długości, 4 km wysokości i zajmuje ponad 300 tys. km² powierzchni.

Coraz częściej nowych danych o morfologii dna oceanicznego i inwentarzu utworów dennych dostarczają wyniki akcji poszukiwawczo-ratunkowych prowadzonych na oceanach po katastrofach samolotów czy okrętów podwodnych. Na przykład po zaginięciu w 2014 r. pasażerskiego samolotu malezyjskiego przez następne trzy lata prowadzono bardzo szeroko zakrojone badania dna Oceanu Indyjskiego, koordynowane przez służby australijskie. Objęto nimi obszar ponad 120 tys. km². Ich wyniki wniosły wiele nowych informacji o morfologii i batymetrii tej części oceanu. W 2017 r. *Australian Transport Safety Bureau* opublikowało raport (ATSB, 2017), zawierający mapę dna oceanicznego, opis świata organicznego na terenie badań oraz nowe dane geologiczne o osadach dennych, umożliwiające nową interpretację perspektyw zasobowych. Niektóre obszary dna oceanu na zachód od Australii zostały tak dokładnie zbadane po raz pierwszy w historii.

Chociaż horyzonty geologicznego rozpoznania dna oceanicznego istotnie się poszerzyły w ostatnich latach, to jednak wobec skali oceanu jego dokładne poznanie będzie długim procesem (ryc. 1). Podobnie uważają m.in. Fouquet i Lacroix (2014).

Rozwój technik i technologii badań oceanicznych sprawia, że cyfrowe odwzorowania morfologii jego dna stają się tak doskonałe, iż umożliwiają analizę procesów złożonych i warunków przyszłej eksploatacji kopalni morskich.

Światowa literatura dotycząca oceanicznych badań geologiczno-złożowych jest bardzo bogata i stale uzupełniana (Marine Minerals, 1987; Cronan, 2000; Gurvich, 2006; ISA, 2010; Fouquet, Lacroix, 2014; Kotliński i in., 2015; Suzuki i in., 2016; Chaney, Almagor, 2017; Sharma, 2017). Dotyczy to także aspektów możliwości górniczego zagospodarowania zasobów oceanicznych (EU, 2014), jak



Ryc. 1. Ocena spełnienia warunków niezbędnych do rozpoczęcia zagospodarowania kopalni oceanicznych (wg Szamałka, 2010, zmieniona i uzupełniona)

Fig. 1. The dynamics of the degree of fulfilment of the conditions, necessary for the start of the development of oceanic mineral resources (after Szamałek 2010, modified and supplemented)

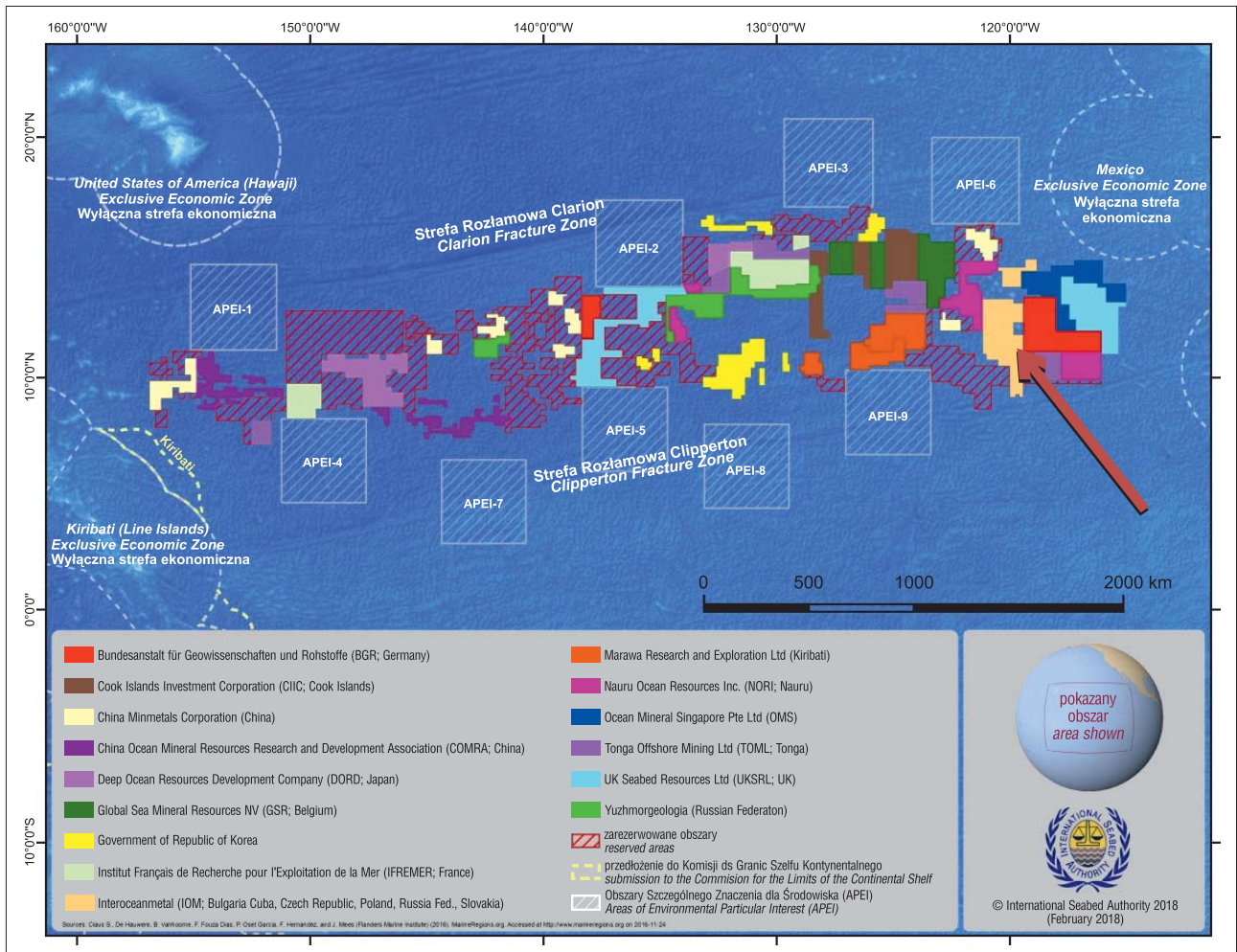
i wpływu ewentualnej eksploatacji na morskie środowisko organiczne, a zwłaszcza na bentos (Berry i in., 2017).

Początkowo szczegółowe badania potencjalnych kopalni oceanicznych koncentrowały się na koncentracjach Fe-Mn, następnie na polimetalicznych siarczankach hydrotermalnych, naskorupieniach kobaltońskich, a współcześnie na łożach metalonowych (Kato i in., 2011; Yasukawa i in., 2015). Ponadto są prowadzone badania możliwości eksploatacji kopalni energetycznych, zwłaszcza z basenów głębokowodnych, a także badania gazohydratów metanu jako największych potencjalnych zasobów gazu ziemnego (Makogon, 2010; Li i in., 2016).

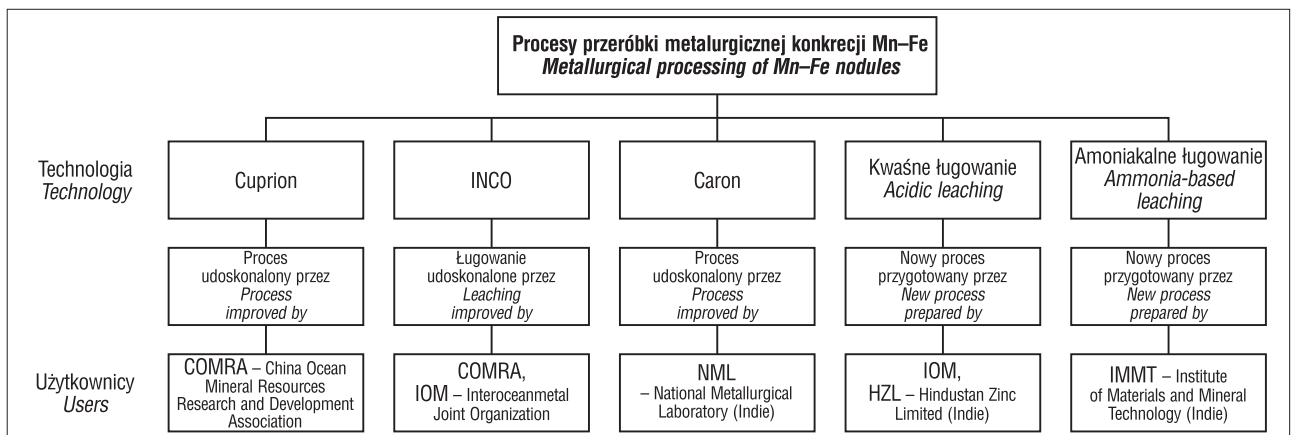
KONKRECJE POLIMETALICZNE

Zasób wiedzy o genezie, mineralogii i geochemii koncentracji Mn-Fe oraz ich rozprzestrzenieniu na dnie oceanów jest efektem wieloletnich badań (Glasby, 1977; ISA, 2010; IOM, 2016; Kuhn i in., 2017), w których istotny udział mają także polscy naukowcy, a szczególnie prof. Ryszard Kotliński (Kotliński, 1999, 2001). Konkrecje polimetaliczne występują na dnie wszystkich oceanów, na głębokości ok. 4000–6000 m. Największe ich nagromadzenie zidentyfikowano w strefie Clarion-Clipperton (CCZ) na Pacyfiku (ryc. 2). W strefie tej koncentruje się aktywność większości kontraktorów ISA. Ocenia się, że w polu CCZ występuje średnio 15 kg koncentracji/m² (Kuhn i in., 2017). Konkrecje Mn-Fe powstają w wyniku wytrącania z hydrotermalnych fluidów, rozpuszczonych w wodach oceanu, uwodnionych tlenków Fe i Mn, wzbogaconych m.in. w Co, Ni oraz Cu. Proces ten jest bardzo powolny – wzrost warstewek koncentracji w CCZ następuje w tempie 1–10 mm/mln lat (Koschinsky, Hein, 2013; IOM, 2016). Do tej pory konkrecje te klasyfikowano wg różnych kryteriów – morfologii, składu mineralnego, składu chemicznego i genezy. Obecnie wskazuje się potrzebę opracowania nowego, jednolitego systemu klasyfikacji koncentracji (ISA, 2014).

Liczne ekspedycje badawcze, organizowane przez kontraktorów ISA, umożliwiły pobranie dużych ilości koncentracji, które posłużyły nie tylko do badań mineralogicznych, ale także do badań technologicznych, prowadzonych w skali półtechnicznej (Pietek i in., 2016). W związku



Ryc. 2. Strefa Clarion-Clipperton z oznaczonymi obszarami poszukiwania i dokumentowania koncentracji Fe-Mn przez kontrahentów ISA. Strzałką zaznaczono obszar badany przez Interoceanmetal (wg <https://www.isa.org.jm/maps>)
Fig. 2. Clarion-Clipperton Zone exploration areas for polymetallic nodules (after <https://www.isa.org.jm/maps>)



Ryc. 3. Podstawowe technologie metalurgicznej przeróbki koncentracji Fe-Mn (Dass, Anand, 2017)
Fig. 3. The state of development of basic technologies of metallurgical processes for nodules and their users (Dass, Anand, 2017)

z tym technologia przerobu koncentracji i pozyskiwania z nich metali jest już w dojrzałym stadium – po próbach przemysłowych (Abramowski i in., 2017). Inwestorzy zaproponowali i wykazali przydatność oraz efektywność różnych rozwiązań technologicznych (Dass, Anand, 2017). W ostatnich latach technologię przerobu koncentracji dopracowały zwłaszcza Interoceanmetal (IOM), China Ocean Mineral Resources Research and Development Association (COMRA)

i Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) (Dass, Anand, 2017; ryc. 3).

Zasoby koncentracji w strefie CCZ, określone na ok. 21 mld t, zawierają ok. 6 mld t Mn, 226 mln t Cu, 274 mln t Ni, 67 mln t Ti, 44 mln t Co, 12 mln t Mo i 15 mln t REE (Kuhn i in., 2017). Poza tradycyjnym zestawem metali możliwych do pozyskania z koncentracji (Fe, Mn, Ni, Co, Mo i Cu) coraz częściej wskazuje się na możliwości pozyskiwania z nich

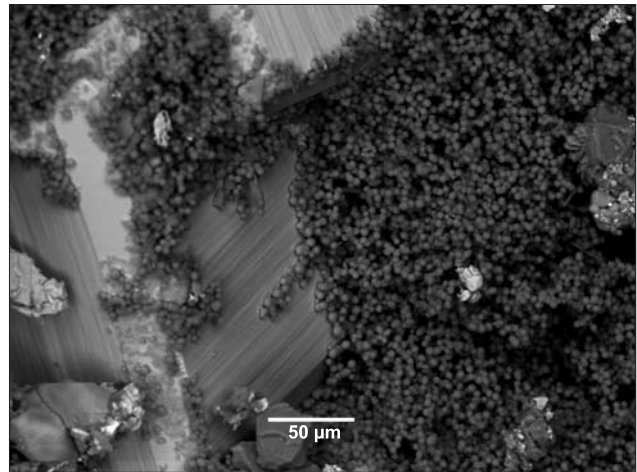
także pierwiastków ziem rzadkich (REE) (Kotliński i in., 1997; Franzen, Balaz, 2012; Hein, 2012; Dimitrowa i in., 2014; Halbach, Jahn, 2016; IOM, 2016).

SIARCZKI POLIMETALICZNE

Morskie złoża siarczków polimetalicznych towarzyszą wypływowi roztworów hydrotermalnych w strefach spreadingu dna oceanicznego. W strefach tych silnie przegrzane (nawet do ok. 400°C) i zmineralizowane roztwory wypływają pod ciśnieniem (do 300 atm) z dna oceanu i kontaktują się z natlenionymi i chłodnymi wodami przydennymi (2–4°C), co prowadzi do szybkiego wytrącania się siarczków metali. Oceaniczne złoża siarczków polimetalicznych składają się głównie z pirytu, markasytu, chalkopiryty i sfalerytu, a także rodzimego srebra i złota. Zawierają 0,9–17,9% Cu; 2,7–17,5% Zn; 0,02–9,7% Pb; 5,5–24,8% Fe; 0,4–13,2 ppm Au i 56–1260 ppm Ag (Cherkashov i in., 2010; Cherkashov, 2017). Obecnie znanych jest już ok. 500 miejsc takiej hydrotermalnej aktywności (Cherkashov, 2017), a prognozy mówią o możliwości występowania na dnie wszechoceanu nawet od 1000 do 5000 miejsc, w których powstały masywne nagromadzenia siarczków (Petersen i in., 2016). Z siarczków planowane jest pozyskiwanie zarówno metali głównych, takich jak Cu, Zn, Pb, Co, Cd, Mo, In, Te, Se, Bi i Ge, ale także metali szlachetnych. Najbardziej dojrzały i zaawansowany technicznie jest projekt surowcowy SOLWARA, przygotowany przez spółkę Nautilus Inc. (Lipton, 2012), dotyczący pozyskiwania siarczków z obszaru wód będących pod jurysdykcją Papui Nowej Gwinei. Projekt ten został ukończony pod względem geologiczno-górnictwem i technologicznym. Jednak termin rozpoczęcia górniczego wydobywania siarczków opóźnia się z powodu sporów spółki Nautilus z rządem Papui Nowej Gwinei, zwłaszcza o podział korzyści z wydobycia metali. Ponadto przeciwko eksploatacji siarczków z pola SOLWARA 1 protestuje ruch *The Deep Sea Mining Campaign*, który obawia się negatywnych skutków podmorskiego górnictwa dla ekosystemu.

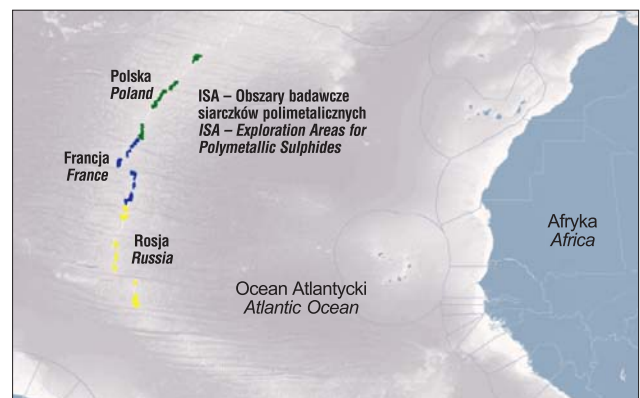
Należy podkreślić, że zdaniem autora to właśnie masywne nagromadzenia siarczków będą jako pierwsze eksploatowane z dna oceanu. Wynika to z następujących przesłanek: złoża siarczków wyraźnie odróżniają się od innych elementów dna oceanicznego, mają stosunkowo nieduże rozmiary i tworzą skoncentrowane ciała rudne. Na przykład, pole Ashadze 1 na Atlantyku, o wymiarach 450 × 350 m, liczy 2,1 mln t rudy, która poza metalami głównymi zawiera znaczącą ekonomicznie ilość metali z grupy PGE i charakteryzuje się bardzo małym udziałem skały płonnej (Cherkashov i in., 2010; Szamałek i in., 2011). Zakłada się, że eksploatacja tego typu złóż będzie polegać na kruszeniu nagromadzeń rudy siarczkowej przez samojedzjne pojazdy bezzałogowe i jej hydraulicznym transporcie do statku bazy na powierzchni morza lub na gromadzeniu urobku w podwodnych stacjach pośrednich i późniejszym transporcie do statku bazy.

Światowe zasoby Cu i Zn w masywnych złożach siarczków polimetalicznych są szacowane na 10 do 30 mln t (Hannington, Petersen, 2016). Badania siarczków ujawniają nowe fakty związane z ich powstawaniem i składem, np. siarczki z ryftu Galapagos mają podwyższoną zawartość platyny (0,89–3,89 ppm) oraz złota (0,30–7,24 ppm), a na ścianach kryształów pirytu odkryto specyficzne, kuliste formy bezpostaciowej krzemionki (Szamałek i in., 2011; ryc. 4).



Ryc. 4. Kuliste formy bezpostaciowej krzemionki (tj. opalu) na prążkowanej powierzchni pirytu – fragment próbki rudy siarczkowej (nr SO39 169GTVB) pobranej z ryftu Galapagos podczas rejsu statku „Sonne”. Próbkę przekazana przez prof. P. Herziga

Fig. 4. Spherical forms of amorphous silica (opal) that occur on the surface of the pyrite crystal (Py) with visible striation. Sample SO39 169GTVB of sulphide ore taken during the cruise of “Sonne” from the Galapagos rift. SEM image. Sample offered by Prof. P. Herzig



Ryc. 5. Lokalizacja obszarów badań siarczków polimetalicznych na Grzbiecie Śród atlantyckim, prowadzonych przez Polskę, Francję i Rosję (https://www.geomar.de/fileadmin/content/forschen/mr/mmr/RP_Sulfides_Areas2017_Website.png)

Fig. 5. The location of the exploration areas for polymetallic sulphides, on the mid-Atlantic Ridge with the areas dedicated to Poland, France and Russia (https://www.geomar.de/fileadmin/content/forschen/mr/mmr/RP_Sulfides_Areas2017_Website.png)

Polska podpisała z ISA kontrakt na 15-letnie badania polimetalicznych siarczków na atlantyckim Grzbiecie Śródoceanicznym (ryc. 5). Otwiera to nowy etap w polskich badaniach zasobów mineralnych oceanu światowego, realizowanych w ramach rządowego programu PrOGeo. Po raz pierwszy Polska będzie samodzielnie prowadzić program oceanicznych badań poszukiwawczo-rozpoznawczych kopalin metalicznych (poprzednie realizowała w ramach IOM).

NASKORUPIENIA KOBALTONOŚNE

W ostatnich latach coraz większą uwagę badaczy przyciągają naskorupienia kobaltonośne (Hein, Koshinsky, 2013), występujące przeważnie na wierzchołkach i zboczach gór podmorskich. Podobnie jak konkretne składają

się one z uwodnionych tlenków Fe i Mn. Łączne zasoby oceanicznych naskorupień kobaltoonośnych są oceniane na ok. 35×10^9 t (Halbach i in., 2017). Zarówno konkretje, jak i naskorupienia mogą być w przyszłości źródłem pozyskiwania wielu metali, w tym Mn, Ti, Ni, Co, Cu, V, Mo, REE, Zn, Pt, W, Nb, Te i Y. Uważa się, że zasoby Mn, Ni, Co, V, Mo, Pt i Y w naskorupieniach przewyższają znane lądowe zasoby tych metali (Halbach i in., 2017). O większej przydatności gospodarczej tego typu złóż i ich przewadze nad konkretjami Mn-Fe może świadczyć to, że naskorupienia występują na mniejszej głębokości (800–3000 m p.p.m.) niż konkretje (głównie 4000–6000 m p.p.m.), a pojedyncza podmorska góra z naskorupieniem o grubości 3,5 cm może zawierać 4×10^6 t rudy polimetalicznej. Co odpowiada nagromadzeniu konkretji na dnie oceanu o gęstości ok. 70 kg/m². Dla porównania warto dodać, że złożowe znaczenie mają nagromadzenia konkretji zawierające zaledwie 6 kg/m² (Halbach i in., 2017). Naskorupienia kobaltoonośne oraz konkretje Fe-Mn są także badane pod kątem możliwości pozyskiwania z nich pierwiastków ziem rzadkich – REE (Halbach, Jahn, 2016). Szczególnie liczne i bogate naskorupienia występują na Pacyfiku, zwłaszcza na wierzchołkach i zboczach podmorskich gujotów.

ILY METALONOŚNE

Od dawna już przypuszczano, że morskie ily o podwyższonej zawartości metali mogą mieć znaczenie złożowe. W pierwszej kolejności analizowano wystąpienia metali w iłach Morza Czerwonego. Obecnie naukowcy japońscy realizują szeroko zakrojone badania iłów i mułów głębokomorskich, zarówno na dnie Pacyfiku (Kato i in., 2011), jak i Oceanu Indyjskiego (Yasukawa i in., 2015). Utwory ilaste na dnie Pacyfiku zawierają do 0,2% wag. REY (pierwiastki ziem rzadkich i itr). W środkowo-północnej części Pacyfiku mają one ok. 24 m miąższości, a w południowo-wschodniej 8 m. Na podstawie tych danych szacuje się, że zasoby REY w pacyficznych iłach są większe od znanych zasobów lądowych, które wynoszą 110×10^6 t (Kato i in., 2011). Badania potencjału osadów eupelagicznych jako nośników REE realizują także polscy badacze (Zawadzki i in., 2015).

GAZOHYDRATY

Wiedza o zasobach metanu w gazohydratach, zarówno morskich, jak i lądowych, znacząco wzrosła w ciągu ostatnich 30 lat (Makogon, 1997). W początkowym okresie oceaniczne badania gazohydratów koncentrowały się na wykrywaniu wszelkich ich wystąpień. Później zaczęto analizować i szacować zasoby dostępne i wydobywalne (Li i in., 2016). I choć szacunki zasobów metanu w gazohydratach uległy znaczącemu zmniejszeniu, ciągle jednak zasoby te są imponujące (Makogon, 2010). Według Chonga i in. (2016) w latach 90. XX w. światowe zasoby gazohydratów szacowano na ok. 20 tys. TCM (trylionów m³), natomiast najnowsze szacunki wskazują na 3 tys. TCM. Nawet te pomniejszone zasoby gazohydratów stanowią bardzo bogatą rezerwę w porównaniu do zasobów gazu ziemnego w złożach konwencjonalnych (ok. 404 TCM) czy w formacjach łupkowych (204–456 TCM) (Chong i in., 2016). Amerykańska służba geologiczna wskazuje rok 2020 jako prawdopodobny początek przemysłowego wydobycia i zagospodarowania podmorskich złóż gazohydratów. Rozpoznanie zasobów gazohydratów i możliwości ich zagospodarowania powinny być jednym z priorytetów

społeczności międzynarodowej w najbliższych latach (Szamałek, 2004).

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Rozpoznanie budowy geologicznej dna oceanicznego i procesów zachodzących w skałach jego podłoża, mimo znacznego postępu, nie jest wystarczające i wymaga dalszych, szeroko zakrojonych badań. Szczególnie istotnym osiągnięciem będzie dowiercenie się do podłoża skorupy oceanicznej. Należy spodziewać się odkrycia nowych utworów, których przydatność surowcowa będzie zależeć od postępu technicznego. Metodyka poszukiwań surowców oceanicznych ciągle jest doskonała i rozwijana (Hekinian, 2014). Stan rozpoznania zasobów kopalin oceanicznych oraz kształtowanie się cen metali na światowych rynkach wskazują, że czas przemysłowego zagospodarowania kopalin oceanicznych jest już blisko (Szamałek, 2011). Prawdopodobnie w pierwszej kolejności zostaną zagospodarowane złoża masywnych polimetalicznych siarczków, a następnie złoża metali występujące w formie naskorupień i konkretji. Podobny pogląd jest wyrażany także w dokumentach UE o przyszłości górnictwa podmorskiego (EU, 2014). Ponadto po roku 2020 należy oczekiwać przemysłowego zagospodarowania złóż gazohydratów metanu.

Wieloletni udział Polski w badaniach konkretji polimetalicznych w strefie Clarion-Clipperton na Pacyfiku (w ramach organizacji Interoceanmetal), rozpoczęcie badań masywnych siarczków polimetalicznych na Grzbiecie Śród atlantyckim oraz przygotowania do podjęcia poszukiwań naskorupień kobaltoonośnych na Pacyfiku czynią Polskę jednym z krajów najbardziej zaangażowanych w poszukiwanie i dokumentowanie złóż kopalin oceanicznych. Kontynuowanie tego zaangażowania będzie wymagało przeznaczenia znacznie większych środków niż dotychczas na ten cel oraz konieczności wykształcenia liczniejszej grupy specjalistów w dziedzinie geologii morza, złóż morskich, górnictwa podmorskiego i technologii przerobu surowców oceanicznych.

Autor serdecznie dziękuje Recenzentom za wnikliwe i pozytywne uwagi, które pozwoliły uniknąć pomyłek i bardzo korzystnie wpłynęły na ostateczną postać artykułu.

LITERATURA

- ABRAMOWSKI T., STEFANOVA V.P., CAUSSE P., ROMANCHUK A. 2017 – Technologies for the processing of polymetallic nodules from Clarion-Clipperton Zone in the Pacific Ocean. *J. Chem. Techn. Metall.*, 52 (2): 258–269.
- ATSB 2017 – http://www.atsb.gov.au/media/5773565/operational-search-for-mh370_final_3oct2017.pdf.
- BERRY W., MCGIVERN A., THIELE T., WILHELM C., GJERDE K. 2017 – Deep seabed mining: A rising environmental challenge. IUCN Global Marine and Polar Programme. https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/dsm_report_14.08.2017.pdf.
- CHANEY R.C., ALMAGÖR G. 2017 – Seafloor Processes and Geotechnology. CRC Press: 558.
- CHERKASHOV G. 2017 – Seafloor Massive Sulphide Deposits: Distribution and Prospecting. [W:] Sharma R. (red.), Deep-Sea Mining. Resource Potential, Technical and Environmental Considerations. Springer: 143–164.
- CHERKASHOV 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. *Marin. Georesour. Geotechnol.*, 28: 222–239.

- CHONG Z.R., YANG S.H.B., BABU P., LINGA P., LI X. 2016 – Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges. *Applied Energy*, 162: 1633–1652.
- CIAŻELA J., KOEPKE J., DICK H.J.B., MUSZYŃSKI A. 2015 – Mantle rock exposures at oceanic core complexes along mid-ocean ridges. *Geologos*, 4: 207–231. DOI: <https://www.degruyter.com/download-pdf/j/logos.2015.21.issue-4/logos-2015-0017/logos-2015-0017.pdf>.
- CIAŻELA J., DICK H.J.B., MACLEOD J.C., BLUM P. 2016 – Ekspedycja IODP 360: pierwszy etap odwiertu do płaszczki Ziemi. *Prz. Geol.*, 64 (11): 889–895.
- CRONAN D.S. 2000 – *Marine Minerals Deposits*. CRC Press LLC.
- DASS R.P., ANAND S. 2017 – *Metallurgical Processing of Polymetallic Ocean Nodules*. [W:] Sharma R. (red.), *Deep-Sea Mining. Resource Potential, Technical and Environmental Considerations*. Springer: 365–394.
- DIMITROVA D., MILAKOVSKA Z., PEYTCHEVA I., STEFANOVA E., STOYANOVA V., ABRAMOWSKI T., WÄLLE M. 2014 – Trace element and REY composition of polymetallic nodules from the eastern Clarion Clipperton Zone (Northern Pacific Ocean) determined by in situ LA-ICP-MS analyses. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des sciences*, 67 (2).
- EU 2014 – Study to investigate the state of knowledge of deep-sea mining. Final Report under FWC MARE/2012/06 – SC E1/2013/04. https://webgate.ec.europa.eu/maritimeforum/sites/maritimeforum/files/FGP96656_DSM_Final_report.pdf
- FOQUET Y., LACROIX D. 2014 – Study summary. [W:] Foquet Y., Lacroix D. (red.), *Deep Marine Mineral Resources*. Springer: 3–40.
- FOQUET Y., LACROIX D. (red.) 2014 – *Deep Marine Mineral Resources*. Springer: 149.
- FRANZEN J., BALAZ P. 2012 – Rare Earth Elements in the Polymetallic Nodules – a New Challenge. [W:] *The Proceedings of the 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference*. Rhodes, Greece: 112–116.
- GLASBY G.P. (red.) 1977 – *Marine Manganese Deposits*. Elsevier Oceanography Ser., 15: 523.
- GURVICH E.G. 2006 – *Metalliferous Sediments of the World Ocean. Fundamental Theory of Deep-Sea Hydrothermal Sedimentation*. Springer Verlag.
- HANNINGTON M., PETERSEN S. 2016 – A Discussion Paper on Marine Minerals. National Ocean Exploration Forum, October 20–21, 2016. <http://oceanexplorer.noaa.gov/national-forum/noef2016-hannington-petersen.pdf>.
- HALBACH P., JAHN A. 2016 – Concentrations and metal potentials of REEs in marine polymetallic nodule and Co-rich crust deposits. [W:] Abramowski T. (red.), *Deep sea mining value chain: organization, technology and development*. IOM, Szczecin: 119–132.
- HALBACH P.E., JAHN A., CHERKASHOV G. 2017 – Marine Co-Rich Ferromanganese Crust Deposits: Description and Formation, Occurrences and Distribution, Estimated World-wide Resources. [W:] Sharma R. (red.), *Deep-Sea Mining. Resource Potential, Technical and Environmental Considerations*. Springer: 65–141.
- HEIN J.R. 2012 – Prospects for Rare Earth Elements from Marine Minerals. Briefing paper, 2. ISA.
- HEIN J.R., KOSCHINSKY A. 2013 – Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules. [W:] Scott S. (red.), *The Treatise on Geochemistry*. Elsevier, 12: 273–290.
- HEIN J.R., MIZELL K., KOSCHINSKY A., CONRAD T.A. 2013 – Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geology Rev.*, 51: 1–14.
- HEKINIAN R. 2014 – Sea floor exploration. *Scientific Adventures Diving into the Abyss*. Springer Oceanography: 370. https://walrus.wr.usgs.gov/research/projects/pac_eez_pubs.html. <https://www.isa.org/jm/news/poland-applies-approval-plan-work-exploration-polymetallic-sulphides>.
- IOM 2016 – Technical report on the Interoceanmetal Joint Organization polymetallic nodules project in the Pacific Ocean Clarion-Clipperton Fracture Zone.
- ISA 2010 – A Geological Model of Polymetallic Nodule Deposits in the Clarion-Clipperton Fracture Zone. ISA Technical Study, 6: 105.
- ISA 2014 – Polymetallic Nodules Resource Classification. ISA Technical Study, 19. International Seabed Authority and Ministry of Earth Sciences, Government of India Workshop held in Goa, India, 13–17 October, 2014. <https://www.isa.org/jm/sites/default/files/files/documents/ts19final-web.pdf>.
- JĘDRYSEK O.M. 2008 – Deep-Ocean Exploration of Metals Ore Deposits Controlled by the International Seabed Authority: Selected Aspects of the Present State and Possible Mining. [W:] Kicki & Sobczyk (red.), 21st WMC & Expo 2008. Taylor & Francis Group, London, UK. http://jedrysek.eu/articles/Deep-ocean_exploration_of_metals.PDF.
- 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. *Nat. Geosci.*, 4: 535–539.
- KOSCHINSKY A., HEIN J.R. 2003 – Uptake of elements from seawater by ferromanganese crusts: solid-phase associations and seawater speciation. *Mar. Geol.*, 198: 331–351.
- KOTLIŃSKI R. 1999 – Metallogenesis of the world's ocean against the background of oceanic crust evolution. *Polish Geol. Inst. Spec. Pap.*, 4: 1–70.
- KOTLIŃSKI R. 2001 – Mineral Resources of the world's ocean – their importance for global economy in the 21st century. [W:] *Proc. of the ISOPE Ocean mining symposium*, Szczecin, Poland: 1–7.
- KOTLIŃSKI R., PARIZEK A., REZEK K. 1997 – Polymetallic Nodules – A Possible Source of Rare Earth Elements. [W:] *The Proceedings of the 2nd ISOPE – Ocean Mining Symposium*, Seoul, Korea: 50–56.
- KOTLIŃSKI R., SZAMAŁEK K. (red.) 1998 – *Surowce mineralne mórz i oceanów*. Wyd. Nauk. Scholar, Warszawa: 384.
- KOTLIŃSKI R., MACIĄG Ł., ZAWADZKI D. 2015 – Potential and recent problems for the possible polymetallic sources in the oceanic deposits. *Geologija i poljezne iskopaemje Mirovogo okeana*, 2 (40): 65–80.
- KUHN T., WEGORZEWSKI A., RÜHLEMANN C., VINK A. 2017 – Composition, Formation and Occurrence of Polymetallic Nodules. [W:] Sharma R. (red.), *Deep-Sea Mining. Resource Potential, Technical and Environmental Considerations*. Springer: 23–63.
- LIPTON I. 2012 – Mineral Resource Estimate: Solwara Project, Bismarck Sea, PNG. Technical Report compiled under N143–101. Golder Associates for Nautilus Minerals Nuigini Inc.
- LI X.S., XU C.G., ZHANG Y., RUAN X.K., LI G., WANG Y. 2016 – Investigation into gas production from natural gas hydrate: A review. *Elsevier, Applied Energy*, 172: 286–322. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.101>.
- MAKOGON Y.F. 1997 – *Hydrates of Hydrocarbons*. Tulsa: 482.
- MAKOGON Y.F. 2010 – Natural gas hydrates – A promising source of energy. *J. Natural Gas Scien. Eng.*, 2: 49–59.
- MARINE MINERALS: Exploring our new ocean frontiers. 1987. US Congress, Office of Technology Assessment.
- PETERSEN S., KRATSCHELL A., AUGUSTIN N., JAMIESON J., HEIN J.R., HANNINGTON M.D. 2016 – News from the seabed-geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources. *Mar. Policy*, 70: 175–187. <https://doi:10.1016/j.marpol.2016.03.012>.
- PIETEK G., LESZCZYŃSKA-SEJDA K., GOTFRYD Ł., BENKE G., SZOŁOMICKI Z., CHMIELARZ A. 2016 – Hydrometallurgical metals recovery from nodules. [W:] *Deep sea mining value chain: organization, technology and development*. Abramowski T. (red.), IOM Szczecin: 173–181.
- SAGER W.W., ZHANG J., KORENAGA J., SANO T., KOPPERS A.A.T., WIDDOWSON D., MAHONEY J.J. 2013 – An immense shield volcano within the Shatsky Rise oceanic plateau, northwest Pacific Ocean. *Nat. Geosci.*, 6: 976–981. doi:10.1038/ngeo1934.
- SHARMA R. (red.) 2017 – *Deep-Sea Mining. Resource Potential, Technical and Environmental Considerations*. Springer: 535.
- SUZUKI K., ISHIBASHI J.I., KATO Y., NOZAKI T. 2016 – Preface: Front edge of submarine mineral resources research in Japan (Part 2). *Geochem. J.*, 50: 449–452.
- SZAMAŁEK K. 2004 – International Research Project on Gas Hydrates: Hydrates in Oceans – Programme of Exploration (HOPE), *Prz. Geol.*, 52 (8/2): 813–816.
- SZAMAŁEK K. 2010 – Szanse i uwarunkowania zagospodarowania kopalni z dna mórz i oceanów. [W:] *Materiały XIX Szkoły Eksploatacji Podziemnej*. IGSMiE PAN Kraków: 50–72.
- SZAMAŁEK K. 2011 – Surowce mineralne z dna mórz i oceanów – stan rozpoznania i perspektywy. *Górn. Geoinż.*, 35 (4/1): 353–370.
- 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 (3): 187–202.
- UCHWAŁA RM z dnia 25 lipca 2017 r. w sprawie stanowienia wieloletniego programu „Program Rozpoznania Geologicznego Oceanów” – PRoGeO. <http://monitorpolski.gov.pl/mp/2017/774>.
- YASUKAWA K., NAKAMURA K., FUJINAGA K., MACHIDA S., OHTA J., TAKAYA Y., KATO Y. 2015 – Rare-earth, major, and trace element geochemistry of deep-sea sediments in the Indian Ocean: Implications for the potential distribution of REY-rich mud in the Indian Ocean. *Geochem. J.*, 49: 621–635.
- ZARZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia z dn. 22 grudnia 2017 r. w sprawie powołania Zespołu do spraw realizacji programu wieloletniego „Programu Rozpoznania Geologicznego Oceanów PRoGeO”. *Dz.U.* z 2017 r. poz.104.
- ZAWADZKI D., MACIĄG Ł., KOTLIŃSKI R. 2015 – Osady eupelagiczne jako potencjalne źródło pozyskiwania pierwiastków ziem rzadkich. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 465: 131–142.