ARTYKUŁY INFORMACYJNE

Blue mining na Atlantyku – realna potrzeba czy potrzeba realizmu?

Stanisław Wołkowicz[1], Andrzej Paulo[2]

S. Wołkowicz

A. Paulo

Blue mining in the Atlantic Ocean – a real need or a need for realism? Prz. Geol., 67: 91–103.

A b s t r a c t. In 2018, Poland was granted the right to explore for ores in the area of the Mid-Atlantic Ridge area of 10 000 km^2, which is the initial stage of the Program of Geological Exploration of Oceans (PRoGeO) accepted by the Government of Poland in July 2017. On the part of decision-makers, expectations are huge in ensuring safe deliveries of a number of metals (Cu, Au, Ag, Pt, REE, Ni, Co, Zn and Mo). The authors carried out a detailed analysis of the published results of research on similar objects in the exclusive economic zones of Japan and Papua New Guinea. Comparative analysis, covering geological-economic, organizational, financial, geo-environmental aspects reveals that in the Polish zone of the MAR one can expect to find rich, but relatively small deposits of Cu, Zn, Ag, and Au, which meet the needs of a small part of domestic demand for these metals in less than 2 years. The geological and economic analysis shows that there is no risk of a collapse of the supply market for these metals. On the other hand, the risk of organizational and financial failure of the oceanic research project was defined as very large. The authors do not deny the need to conduct basic oceanic research. On the contrary, such research should be carried out even if the economic goal is very distant in time and vaguely outlined. However, the method of preparing and evaluating the program of such research should not differ from the standards adopted for serious research grants, so it should have an original character, be prepared by leading research centers in a given field and be thoroughly evaluated by independent experts. Then a wide discussion will be possible in the scientific community regarding the purposefulness, scope and costs of the work.

Keywords: *Blue mining, PRoGeO, Mid-Atlantic Ridge (MAR), Seafloor Massive Sulfides (SMS)*

Udział surowców mineralnych wydobywanych z głębi oceanicznych w światowym rynku jest nikły, mimo że morza i oceany zajmują 71,7% powierzchni Ziemi. Powodów jest kilka: późne zainteresowanie złożami morskimi w następstwie słabego rozpoznania geologicznego tych obszarów, brak technologii, względna wystarczalność złóż na lądach, długo nieuregulowane prawa własności mórz oraz konflikty środowiskowe.

W ciągu ostatnich 50 lat zainteresowanie podłożem oceanów gwałtownie wzrosło i obserwujemy swoisty światowy wyścig w dostępie do jego zasobów. Obecnie 20 państw prowadzi badania na wodach międzynarodowych, a wiele innych realizuje je w swoich wyłącznych strefach ekonomicznych. Regulacje dostępu do zasobów den morskich i oceanicznych opierają się na odległości od brzegu i głębokości (ryc. 1). Nową definicję szelfu opracowuje obecnie Komisja Granic Szelfu Kontynentalnego. Od roku 1986 Polska w ramach Interoceanmetal (IOM) bierze udział w badaniach złóż konkrecji manganowych w polu Clarion-Clipperton (CCZ) na Pacyfiku, a w 2018 r. otrzymała od *International Seabed Authority* (ISA) licencję na prowadzenie badań na Atlantyku w zakresie poszukiwania siarczkowych rud metali. Ponadto w 2017 r. Rada Ministrów RP przyjęła program PRoGeO poświęcony badaniom wybranych stref dna oceanicznego wód międzynarodowych w latach 2017–2033 w ramach realizacji polityki surowcowej, obronności i bezpieczeństwa państwa oraz ochrony środowiska (Uchwała, 2017). Skłania to do podjęcia rozważań na temat zakresu badań, ich znaczenia, określenia konkretnych celów oraz przeznaczenia środków niezbędnych do ich osiągnięcia.

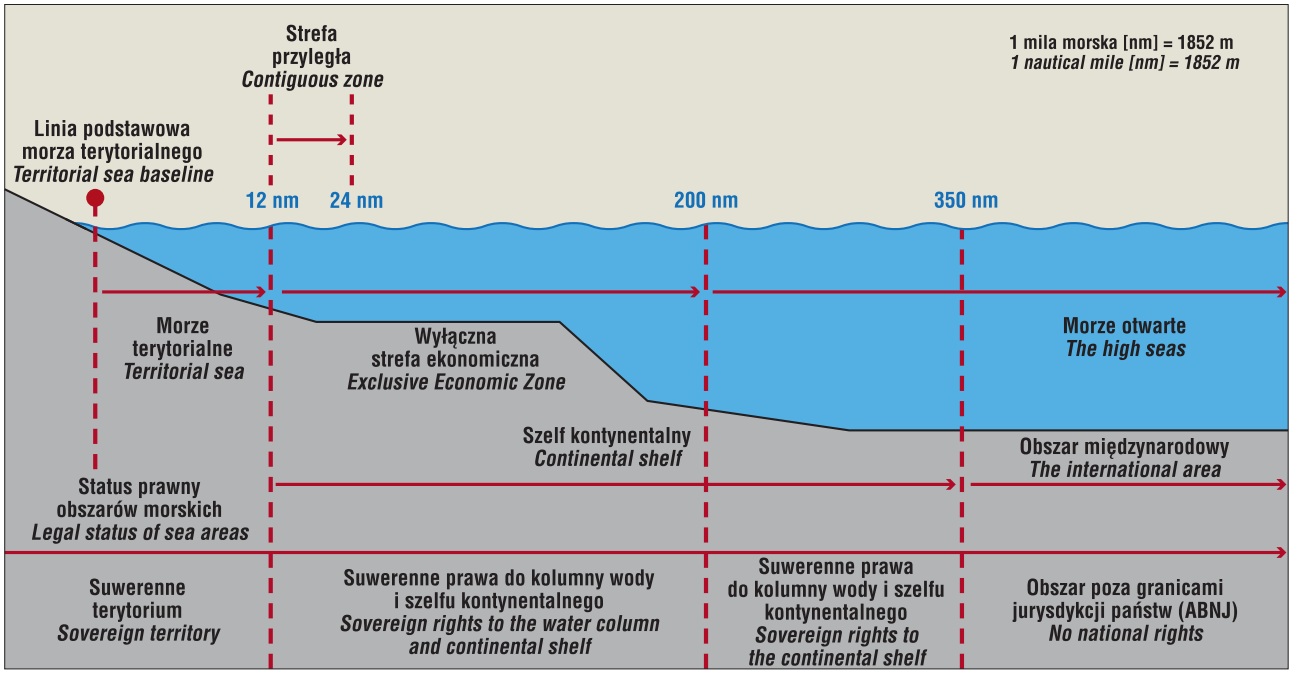
BLUE MINING

W literaturze geologicznej eksploracja i eksploatacja kopalin z obszarów mórz i oceanów ma różne nazewnictwo, co wynika z tego, że środowiska występowania bogactw mineralnych są bardzo zróżnicowane, od płytkich stref przybrzeżnych począwszy, na głębiach oceanicznych skończywszy. Używane są takie terminy jak *off shore mining*, *sea-bed mining*, *deep-sea mining*. Najmniej technicznym określeniem, ale obejmującym całość problematyki, jest *blue mining*. Nazwę *Blue Mining Consortium* przyjęła grupa 19 jego członków, rekrutujących się spośród przedsiębiorstw, jednostek badawczych i uniwersytetów, która w latach 2014–2018 w ramach VII Programu Ramowego Unii Europejskiej realizowała badania dna morskiego w celu znalezienia zasobów surowców mineralnych, oceny ich wartości ekonomicznej oraz opracowania technologii ich wydobycia z dna na powierzchnię morza (Public Report, 2018).

Historia rozpoznania surowcowego obszarów mórz i oceanów jest znacznie krótsza od badań prowadzonych na lądzie (Kotliński, Szamałek 1998). Warto zauważyć, że jednym z prekursorów eksploatacji morskich zasobów był Witold Zglenicki (1850–1904), który już w roku 1896 opracował projekt techniczny urządzenia do podmorskich wierceń i wydobycia ropy naftowej z platformy wiertniczej.

[1] Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; stanislaw.wolkowicz@pgi.gov.pl

[2] AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30; andrzej.paulo@interia.pl



Ryc. 1. Międzynarodowe prawo własności wód i dna oceanów (UNCLOS)
Fig. 1. Maritime Zones – the 1982 United Nations Convention on the Law of Sea (UNCLOS)

Tab. 1. Złoża ważniejszych kopalin wykryte i eksploatowane na obszarach morskich
Table 1. The deposits of major mineral raw materials discovered and exploited in the sea areas

Kopalina *Mineral*	**Morza płytkie** / *Shallow sea*		**Głębie oceaniczne** / *Ocean depths*		**Problemy środowiskowe górnictwa** *Environmental problems of mining*
	Duże złoża *Large deposits*	Eksploatacja *Exploitation*	Potencjalne złoża *Potential deposits*	Eksploatacja *Exploitation*	
Złoża okruchowe *Clastic deposits*					
Kruszywa / *Aggregates*	x	x			x
Diamenty / *Diamonds*	x	x			x
Złoto / *Gold*		(x)			(x)
Rudy Ti-Zr / *Ti-Zr ores*	x	x			x
Rudy Fe-Ti / *Fe-Ti ores*		x			(x)
Rudy Sn / *Sn ores*	x	x			x
Fosforyty *Phoshate rocks*	x		x		?
Siarka rodzima *Native sulfur*					?
Ropa naftowa *Petroleum*	x	x	x	x	(x)
Gaz ziemny *Natural gas*	x	x	x		(x)
Gazohydraty *Gas hydrates*	x		x		?
Konkrecje Mn-Fe (Co-Ni-Cu...) *Mn-Fe nodules*			x	k ISA17	
Naskorupienia Co *Cobalt-rich crusts*			x	k ISA4	
Muły z REE *REE muds*			x		
Siarczki Cu-Zn (Ag, Au) *Cu-Zn sulfides*			x	k ISA7	x
Muły – solanki metalonośne *Metal-rich brines*			x	k ISA1	

k – udzielone koncesje na rozpoznanie i pilotażową eksploatację; x – istotne znaczenie; (x) – znaczenie drugorzędne
k – licenses granted for exploration and pilot exploitation; x – significant; (x) – subordinate

SUROWCE POZYSKIWANE Z DNA OCEANÓW

Aktualny stan rozpoznania podwodnych zasobów mineralnych w oceanach przedstawili polskiemu czytelnikowi: Kotliński i Szamałek (1998), Kotliński (1999, 2001), Szamałek (2011, 2018a), a przemysłowe wykorzystanie omówili Innis i Simcock (2016). Ważniejsze informacje zestawiono w tabeli 1. Wykorzystanie tak różnych kopalin niesie swoiste problemy technologiczne, środowiskowe i prawne oraz skutki finansowe w różnej skali.

W powyższym zestawieniu uwzględniono pierwiastki ziem rzadkich (REE). Głębokowodne muły w Pacyfiku mogą być traktowane jako ich potencjalna kopalina, jeśli warunki geologiczno-górnicze tych wystąpień, odkrytych niedawno (Kato i in., 2011; Takaya, 2018), okażą się sprzyjające, a ekstrakcja składników użytecznych opłacalna.

Polskie badania koncentrowały się dotąd na polimetalicznych konkrecjach manganowych na obszarze koncesji w strefie CCZ na Pacyfiku, przyznanej przez ISA międzynarodowej organizacji IOM (Szamałek, 2018b). Doświadczenia z badań złóż konkrecji pacyficznych będzie trudno wykorzystać do badania złóż siarczków w strefie ryftowej Atlantyku, gdzie Polska z początkiem 2018 r. uzyskała od ISA prawo do poszukiwania złóż i rozpoznania zasobów na obszarze 10 tys. km^2 przez 15 lat. Czas ten może być przedłużany o kolejne okresy 5-letnie. Na tym obszarze koncesyjnym można spodziewać się odkrycia złoża polimetalicznych siarczków zawierających miedź i cynk oraz znaczną domieszkę srebra i złota. Obszar ten ciągnie się wzdłuż osiowej części Grzbietu Śródatlantyckiego (*Mid-Atlantic Ridge*, MAR) (ryc. 1) w strefie szerokości geograficznych 26°10'–32°45'N, na długości ok. 950 km (z przerwami) i leży na północ od obszaru objętego koncesją dla Francji (650 km długości) i Rosji (1000 km).

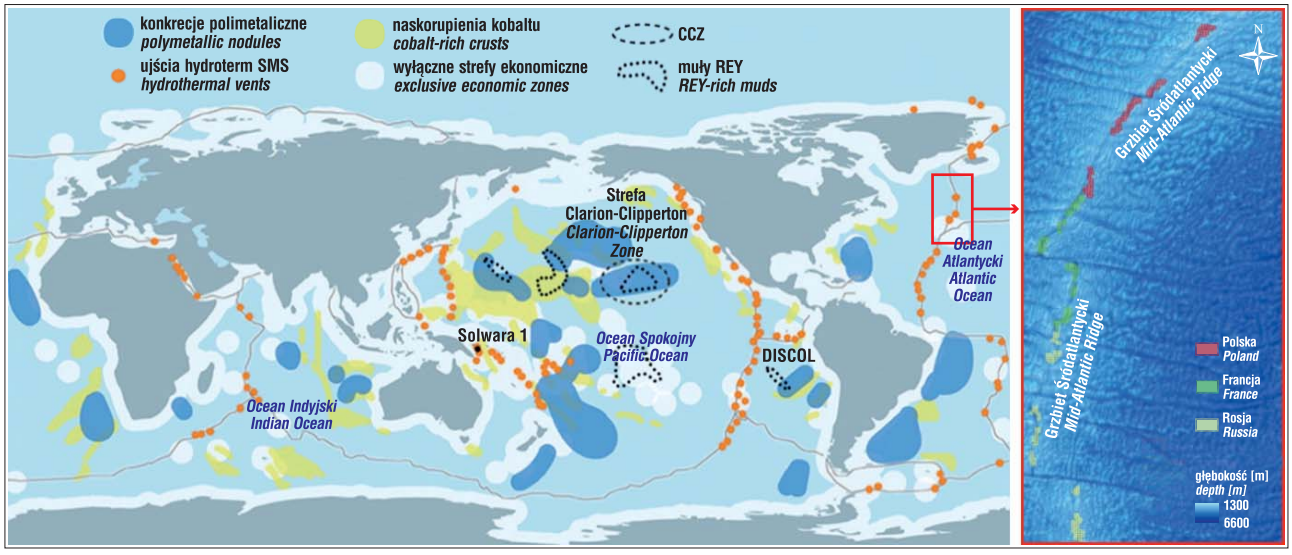
MODEL POSZUKIWANEGO ZŁOŻA I DOŚWIADCZENIA EKSPLORACJI

Przed podjęciem poszukiwań trzeba jasno określić cele badawcze. Im bardziej szczegółowo zostaną one opisane, tym łatwiej będzie opracować i wdrożyć metodykę poszukiwań złóż oraz ocenić celowość i możliwość ich zagospodarowania.

Analiza statystyczna środowiska występowania źródeł hydrotermalnych pozwoliła na przewidywanie 800–1000 nieodkrytych dotąd miejsc, głównie wzdłuż stref powolnego rozsuwania płyt oceanicznych (Beaulieu i in., 2015; German i in., 2016). Około 10-krotnie więcej skupień siarczków mogło powstać wokół nieczynnych już źródeł (Petersen i in., 2017, 2018).

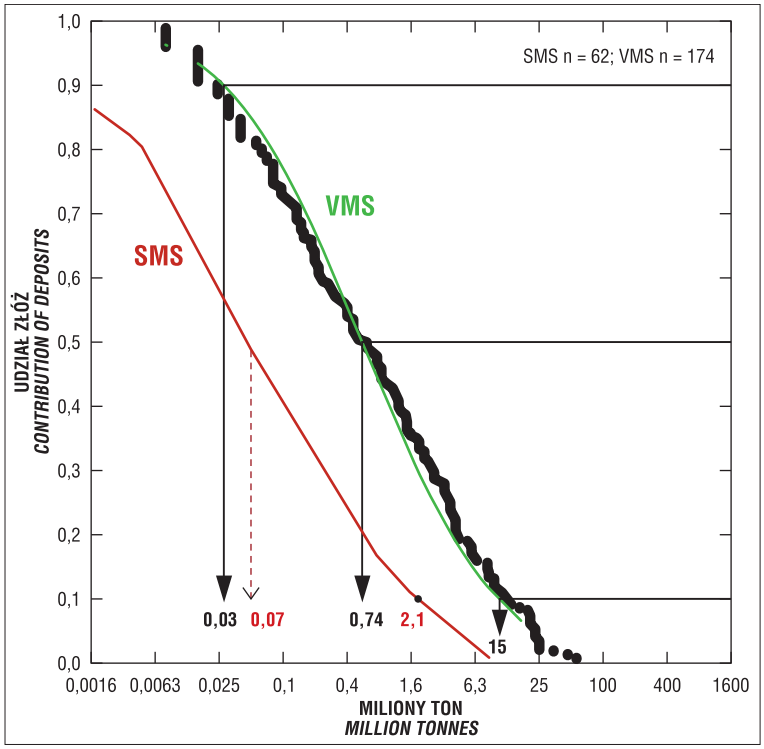
Od czasu odkrycia pierwszego czarnego komina (*black smoker*) w 1979 r. zidentyfikowano 300–400 podmorskich źródeł hydrotermalnych i związanych z nimi nagromadzeń masywnych siarczków (*Seafloor Massive Sulfides*, SMS), z czego tylko 165 uznano za znaczące złożowo. W okresie 2011–2016 ISA udzieliła 6 koncesji na eksplorację SMS w obszarze jurysdykcji międzynarodowej (*Area Beyond National Jurisdiction*, ABNJ), każda o powierzchni 10 tys. km^2 (Hannington, Petersen, 2016). Wcześniej na lądach zbadano podobną ilość złóż określanych w literaturze jako wulkanogeniczne lub pirytowe, ekshalacyjno-osadowe (Paulo, Strzelska-Smakowska 2000; Hannington i in., 2010). Pozwala to na zbudowanie modeli opisowych i statystycznie umocowanych modeli ilościowych. Bliższa analiza złóż lądowych ujawniła spore zróżnicowanie i doprowadziła do wydzielenia podtypów: cypryjskiego, Besshi, Kuroko i in. (Cox, Singer, 1986; Hannington, 2009; Shanks, Thurston, 2012). Złoża lądowe występują w skałach różnego wieku, od archaicznych do plioceńskich, natomiast te na powierzchni dna morskiego są uważane za czwartorzędowe, nie zmienione tektonicznie i wietrzeniowo analogi lądowych złóż pirytowych.

Prawie wszystkie złoża podmorskie SMS znajdują się na granicy płyt litosferycznych, gdzie istnieje związek przestrzenny i czasowy między magmatyzmem, aktywnością sejsmiczną i wypływem roztworów hydrotermalnych (ryc. 2). Najdłuższe granice płyt biegną wśród oceanów i 2/3 nagromadzeń masywnych siarczków znaleziono w ryftowych grzbietach oceanicznych, 22% w załukowych strefach rozrostu, a 12% wzdłuż łuków wulkanicznych



Ryc. 2. Potencjalne złoża metali na wodach państwowych (EEZ) i międzynarodowych (ABNJ). Po prawej u góry polska działka w Grzbiecie Śródatlantyckim (MAR)

Fig. 2. Potential metal ore deposits in exclusive economic zones (EEZ) and areas beyond the limits of national jurisdiction (ABNJ). Insert: the Polish exploratory concession for the Mid-Atlantic area



Ryc. 3. Porównanie zasobów złóż masywnych siarczków na lądzie VMS i w oceanach SMS (Hannington i in., 2010, uzupełniono)
Fig. 3. Comparison of resources of Volcanogenic Massive Sulfides (VMS) on land and Seafloor Massive Sulfides (SMS) in oceans (Hannington i in., 2010, supplemented)

(Hannington i in., 2011). Największe nagromadzenia SMS występują w ryftach powoli rozsuwających się, gdzie epizody wulkaniczne są przedzielone rozwojem spękań i nie niszczą produktów ekshalacyjno-osadowych. Na ogół występują w wierzchołkowych częściach budowli wulkanicznych o wysokości do kilkuset metrów. Polski obszar koncesyjny leży w mało aktywnym typie ryftu (ryc. 2), gdzie ekshalacje wiążą się z magmą zasadową–ultrazasadową i mogą się rozprzestrzeniać pod pokrywą osadową (Petersen i in., 2018). Skutkuje to trudniejszym wykrywaniem w badaniach oceanograficznych, lecz nieco większymi zasobami i podwyższoną zawartością metali użytecznych. Hannington i in. (2010) oceniają dla tej części ryftu powierzchnię perspektywiczną do odkrycia złoża SMS związaną z segmentem TAG (*Trans-Atlantic Geotraverse*) – Broken Spur na 50 tys. km^2 z dwoma potencjalnymi złożami w odległości ok. 300 km.

Jednakże rozpoznanie budowy złóż na dnie oceanu jest znacznie trudniejsze od złóż na lądach i ich opracowane modele posiadają jeszcze wiele luk. Aparatura do podwodnych badań umożliwiała ropoznanie przede wszystkim powierzchni potencjalnych złóż i otoczenia kominów hydrotermalnych. Na powierzchni osadów siarczkowych znajduje się ochrowa powłoka maskująca granice siarczków, która jest bardziej rozległa od zasięgu występowania SMS. W złożach oddalonych od osi ryftu zwykle występuje pokrywa jaspisu i mułu lub lawy maskująca podłoże, brak też aktywności hydrotermalnej. Testuje się skuteczność nowych technik geofizycznych, m.in. sejsmicznych i elektromagnetycznych, oraz sensorów zamontowanych w autonomicznych robotach (*autonomous underwater vehicle*s, AUV), które na razie są w stanie spenetrować tylko 47 km^2 w czasie pojedynczego rejsu (Petersen i in., 2018). W praktyce trzeba by dysponować flotyllą takich robotów, a po wykryciu obiecującej anomalii wykonać wiercenia.

Hannington i in. (2010) zwracają uwagę, że próbki SMS pobrane z powierzchni dna, czyli stropu złoża, wykazywały zwykle wyższą zawartość metali od próbek rdzeniowych, pochodzących z głębszej części ciał rudnych. Wyniki analiz tych próbek nie mogą więc być uznane za reprezentatywne dla całego złoża. Brak lub niewiele jest danych o budowie wewnętrznej ciał rudnych, stosunku do skał otaczających i ich litologii. Wiadomo już, że granice boczne i spągowe tego typu złóż są zwykle nieostre, co będzie skutkowało stratami zasobów i znacznym zubożeniem rudy. Zdalne sterowanie eksploatacją przez podwodne roboty (ROV) będzie trudne. W części spągowej można się spodziewać obecności sztokwerku o mniejszej zawartości siarczków i odmiennej urabialności skał. Badanie próbek z rdzeni wykazało mały ciężar objętościowy, co wynika z niespodziewanie dużej porowatości rudy. Trzeba to uwzględnić w oszacowaniu masy zasobów złoża.

Rozpoznanie większości nagromadzeń SMS jest ciągle niewystarczające, ma małą gęstość pobierania próbek i nie zawsze sięga spągu złoża. Spośród 62 dużych i dobrze rozpoznanych obiektów, tylko 6–8 miało rozmiary sugerujące zasoby ponad 2 mln t rudy, a mediana zasobów tych obiecujących obiektów wynosi 70 tys. t metali użytecznych, zawartość Cu+Zn bywa na poziomie 15% (Hannington i in., 2010). Te parametry jakości są zbliżone lub nieco wyższe od złóż podobnego typu znanych na lądach, jednak wielkość zasobów jest mniejsza o rząd wielkości (ryc. 3). Na rozległym polu TAG wykonano 17 otworów do głębokości max. 125 m p.p.d. i wykazano zasoby 2,7 mln t. Według Cherkashova i in. (2010) zasoby wynoszą 4 mln t rudy, przy miąższości 40–50 m. Miąższość złóż Ashadze 1 i Krasnov to odpowiednio 10 i 25 m. Inne parametry największych obiektów odkrytych dotąd w Grzbiecie Śródatlantyckim podano w tabeli 2. W skali świata jako największe złoże SMS wymienia się Bent Hill na Pacyfiku, z zasobami ponad 9 mln t siarczków (Zierenberg i in., 1998).

Z tego przeglądu wynika, że złoża SMS są zasobowo małe, choć rudy są bogatsze. Pojedyncze złoże, nawet w zbiorze tych największych, będzie wyczerpane w ciągu 1–2 lat. Natomiast cykl poszukiwania, ocen, uzgodnień środowiskowych będzie trwał co najmniej 10 lat. Doświadczenia pionierskiego projektu Solwara 1, podjętego przez kanadyjską firmę Nautilus, nakazują dużą ostrożność prognozowanego czasu zamrożenia funduszy inwestycyjnych i... cierpliwość. Spowolnienie realizacji projektu Solwara wynika głównie z protestów ludności. Pouczające jest prześledzenie losów tego projektu, który wydawał się wyjątkowo korzystnie położonym w stosunkowo płytkich (1,6 km) wodach wyłącznej strefy ekonomicznej Papui Nowej Gwinei.

W tym rejonie mineralizację polimetaliczną z dużą domieszką złota odkryto w 1985 r. Z czasem rozpoznano wstępnie zasoby geologiczne oszacowane na ok. 0,8 mln t

Tab. 2. Charakterystyka najbogatszych złóż siarczkowych (SMS) Grzbietu Śródatlantyckiego (Hannington i in., 2010; Cherkashov i in., 2010) w porównaniu z medianą głównych złóż tego typu VMS (Volcanogenic Massive Sulfide) na lądach (Paulo, Strzelska-Smakowska, 2000)
Table 2. Characteristics of the richest Seafloor Massive Sulfide (SMS) deposits of the Mid-Atlantic Ridge (MAR) (Hannington et al., 2010; Cherkashov et al., 2010) in comparison with the median of the main Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) deposits on lands (Paulo, Strzelska-Smakowska 2000)

Nazwa *Name*	**Obszar** *Area* [ha]	**Zasoby rudy** *Ore resources* [Mt]	**Głębokość** *Depth* [m p.p.m.]	**Zawartość** *Content* [%]			**Zawartość** *Content* [g/t]	
				Cu	**Zn**	**Pb**	**Au**	**Ag**
Broken Spur	0,5	bd	3100	4,8	3,7	<0,1	1,6	30
TAG	3	2,7	3670	4,9	6,5	<0,1	1,8	92
Krasnov	15	~3	3750	1,7	0,4	<0,1	0,8	26
Ashadze 1	5	<1	4100	10,5	17,6	<0,1	3,5	88
SMS oceany* *SMS oceans**	0,5–1,0	0,07	1500–4100	4,3	10,6	0,1	1,7	107
VMS na lądzie *VMS ashore*	1–200**	0,7–3	0–500 ppt	1,5 (0,4–3,5)	1,1–4,0	0,7–1,0	0,7–1,0	31–94

* średnia 62 największych obiektów, ** suma kilku ciał rudnych
* the average of the 62 largest sites, ** the sum of several metal ore bodies

(w odpowiedniku kategorii C_1–C_2), oraz niespełna 1,2 mln t prawdopodobnych (D_1) (Coffey, 2008; Hoagland i in., 2010). Występują one w pięciu ciałach rudnych na głębokości dna 1450–1700 m. Po 12 latach rząd Papui Nowej Gwinei jako pierwszy na świecie wydał zezwolenie na dzierżawę działki podwodnej pod eksploatację, a po kolejnych 10 latach wykonano wstępną ocenę wpływu środowiskowego (*Environmental Impact Assessment*, EIA). W 2009 r. Nautilus uzyskał od rządu Papui Nowej Gwinei zezwolenie środowiskowe na 25 lat i rozpoczął kampanię informacyjną. W 2011 r. uzyskał koncesję geologiczno-górniczą na obszar ok. 59 km^2. Po rozpoznaniu wytypowano obszar górniczy o powierzchni 0,112 km^2, na którym w 5 ciałach rudnych stwierdzono średnią zawartość ok. 7% Cu i 6 g/t Au. Działalność górnicza wraz z rekultywacją miała trwać zaledwie 2,5 roku, a próby techniczne maszyn podwodnych przeprowadzono w odległym miejscu (Miller i in., 2018). Jednak obawy o dramatyczne zmiany środowiska oraz trwałość organizmów żywych i los społeczności korzystającej tradycyjnie z zasobów morza spowodowały szeroki opór różnych kręgów: naukowych, studenckich, kościelnych, samorządowych, parlamentarnych itp. (Luick, 2012). Pomimo udzielenia koncesji przez rząd i gotowości firmy Nautilus do wydobycia od roku 2019, nie uzyskano do dziś akceptacji społecznej na podjęcie wydobycia rudy z działki zredukowanej do zaledwie 9 ha. W grudniu 2017 r. przedstawiciele społeczności nadbrzeżnych wystąpili przeciw rządowi Papui Nowej Gwinei do sądu, domagając się udostępnienia kluczowych dokumentów dotyczących koncesji, a także środowiskowych, zdrowotnych i ekonomicznych skutków projektu Solwara 1.

Nautilus sfinansował prace związane z rozpoznaniem złoża. Odwiercono i pobrano próbki z 146 otworów do głębokości maksymalnej 20 m p.p.d. Zasoby geologiczne rudy oceniono na 2,1 mln t w strefie kominowej (sztokwerkowej?) o powierzchni 9 ha (Hanninton i in., 2011). W nadziei powiększenia zasobów odwiercono ponad 360 dodatkowych otworów, uzyskując w sumie 2,5 mln t rudy (Golder Associates, 2012). Zakupiono maszyny, których funkcjonowanie w głębinach powinno być poprzedzone eksperymentem eksploatacji złoża. Firma poniosła ogromne koszty – w okresie 30 lat, a brak jest przychodów z eksploatacji, której rozpoczęcie oddala się w nieokreśloną przyszłość.

OCENA PRZYCHODÓW Z EKSPLOATACJI ZŁOŻA MODELOWEGO

Do skonstruowania modelu przychodów założono, że przyjęte będą parametry znacznie wyższe niż mediana wyznaczona dla potencjalnych złóż SMS, tj. 1 mln t rudy zawierającej: 5% Cu, 5% Zn, 0,1% Pb, 2 g/t Au i 100 g/t Ag. Prognozowano, że uda się wydobyć całą ilość rudy i metali zawartych w złożu. W łatwiejszych do eksploatacji złożach na powierzchni straty górnicze wynoszą 10–30%. Przy eksploatacji nieregularnego i niewidzialnego złoża nieuniknione jest zubożenie urobku, które optymistycznie przyjęto na 20%.

Kolejnym etapem jest przeróbka mechaniczna. Wzbogacanie bogatych w piryt rud polimetalicznych jest trudne; w kopalniach naziemnych produkuje się z nich oddzielne koncentraty zawierające 20–25% Cu i ok. 50% Zn, przy uzysku ok. 70% Cu i 50–60% Zn (Paulo, Strzelska-Smakowska, 2000). Oznaczałoby to zawartość ok. 35 tys. t miedzi i 27,5 tys. t cynku w koncentratach selektywnych. Ołów należy pominąć, bo jest składnikiem śladowym i utrudnia wzbogacanie. Ceny takich koncentratów są stosunkowo niskie ze względu na niską zawartość głównych metali i zanieczyszczenie. Ich wartość podwyższają natomiast domieszki metali szlachetnych, które są wyraźnie większe od progu opłacalności odzysku. Jednakże nawet najbardziej wydajne metody odzysku złota dostarczają tylko 40% tego metalu zawartego w pirytach polimetalicznych (Birney i in., 2007). Przetwarzanie hutnicze i elektrometalurgiczne takich zanieczyszczonych koncentratów jest skomplikowane, kosztowne i wymaga technologii innych od tych stosowanych obecnie w Polsce. Szacunek przybliżony wskazuje na możliwość uzyskania 30–35 tys. t miedzi rafinowanej i ok. 25 tys. t cynku High Grade (jeśli tak wysoka jakość 99,9% Zn, kontraktowana na *London Metal Exchange* (LME), jest w ogóle osiągalna). Ilości te są wielokrotnie mniejsze od bieżącego zapotrzebowania gospodarki krajowej. Zakładając, że uda się odzyskać połowę metali szlachetnych, otrzymamy 1 t Au i 50 t Ag.

A jaka jest orientacyjna wartość sprzedażna tych metali w cenach bieżących? Około 200 mln USD za miedź, ok. 60 mln USD za cynk oraz 55–60 mln USD za metale szlachetne. Aby ocenić efekt finansowy netto, trzeba by znać wszystkie koszty związane z eksploatacją podmorską, transportem do zakładu metalurgicznego *via* port morski, w którym muszą być zbudowane odpowiednie instalacje oraz koszt produkcji metalurgicznej (wytworzenie koncentratu i przeróbka hutnicza).

PROGRAM ROZPOZNANIA GEOLOGICZNEGO OCEANÓW (PRoGeO) – OCZEKIWANIA GŁÓWNEGO GEOLOGA KRAJU WZGLĘDEM KONCESJI NA ATLANTYKU

Rada Ministrów RP 25 lipca 2017 r. uchwaliła Program Rozpoznania Geologicznego Oceanów (PRoGeO) (Uchwała, 2017), który jest traktowany przez Głównego Geologa Kraju (GGK) jako jeden z programów wykonawczych Polityki Surowcowej Państwa (PSP). Stoi to w pewnej niezgodności czasowej z tokiem pracy nad PSP, której projekt został opublikowany w styczniu 2018 r. Na 15 letni okres realizacji programu PRoGeO rząd przeznaczył kwotę 530 mln zł, z tym że głównym finansującym będzie Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Oczekiwania co do efektów jego realizacji są ogromne. Według zapisów zawartych w Programie Wieloletnim PRoGeO (str. 5) jego realizacja *(...) Doprowadzi także do zwiększenia bezpieczeństwa surowcowego Rzeczpospolitej Polskiej, warunkującego dynamiczny rozwój gospodarki oraz poprawę komfortu życia obywateli i podniesienie międzynarodowej pozycji RP. Pośrednio ewentualne wykorzystanie zasobów złóż oceanicznych wpłynie pozytywnie na ograniczenie wpływu eksploatacji złóż lądowych na środowisko.*

Bezpieczeństwo surowcowe ma być zapewnione w odniesieniu do zapotrzebowania na miedź, złoto, srebro, platynę oraz pierwiastki ziem rzadkich. Wspomina się w PRoGeO także o takich metalach jak: nikiel, kobalt, cynk i molibden. Z wykonanego rozpoznania wynika, że polska działka na Atlantyku ma najlepsze jakościowo złoża (wypowiedź M.O. Jędryska w: Chilmon, 2018). Warto jednak w tym miejscu nadmienić, że z końcem 2016 r. Polska kupiła współrzędne geograficzne potencjalnego obszaru złożowego od Ogólnorosyjskiego Naukowo-Badawczego Instytutu Geologii i Zasobów Mineralnych Oceanu Światowego im. Igora Gramberga w Petersburgu, który, jak twierdzi GGK, prowadził na tym terenie badania. Należy natomiast zauważyć, że brak jest wiarygodnych informacji naukowych o potencjale surowcowym tego obszaru, dużo jest natomiast jednostronnych doniesień prasowych, których wartość merytoryczna jest znikoma.

W tym szumie informacyjnym warto zauważyć stonowaną wypowiedź M. Lodge'a, sekretarza generalnego ISA (Przybylski, 2018), który stwierdził *przestrzegałbym jednak przed nadmiernie wybujałymi oczekiwaniami. Górnictwo jest inwestycją o długim okresie zwrotu i proces wydobycia zajmuje raczej dekady niż lata. Uruchomienie przemysłowej eksploatacji trochę zatem potrwa. Ale jeżeli teraz się nie uda ruszyć z tym projektem, to zapewne trafi w odstawkę, zanim kolejna generacja górników go rozpatrzy ponownie.*

SUROWCOWE ZAPOTRZEBOWANIE POLSKI I WYSTARCZALNOŚĆ ZASOBÓW

Jako zapotrzebowanie przyjęto wielkość rocznego zużycia surowca przez przemysł krajowy, na podstawie ostatniego opublikowanego *Bilansu gospodarki surowcami mineralnymi Polski i świata* (Bilans, 2015). Ze względu na znaczny udział przerabianego złomu w produkcji finalnej metali uwzględniono tylko ich ilości zawarte w koncentratach przetwarzanych przez huty. Jako wystarczalność zasobów krajowych przyjęto spodziewany rok zamknięcia ostatniej czynnej kopalni rud miedzi lub cynku w Polsce. Podstawowe informacje zawarto w tabeli 3.

Tabela 3 nie ujmuje złota, którego ilości są trudne do określenia. Jego produkcja krajowa z surowców pierwotnych w 2017 r. wyniosła 571,7 kg, a produkcja metali szlachetnych (Au, Pt, Pd) łącznie z wsadami obcymi – 3648 kg (Malon i in., 2018). Zużycie jest dość trudne do oszacowania, bo nakłada się na nie znaczący przerób złomu złota jubilerskiego.

Produkcja cynku z rud krajowych skończy się prawdopodobnie w 2019 r. na skutek wyczerpania zasobów ostatniej kopalni (Paulo, Wnuk, 2015). Jednakże już od 2011 r. ZGH Bolesław prowadzi eksploatację z własnego złoża Gradir Montenegro (Czarnogóra), którego zasoby zapewnią produkcję do ok. 2040 r. (Bilans, 2015). Szansa na zaspokojenie niedoborów zaopatrzenia polskiego przemysłu w cynk istnieje ponadto w wielu krajach i źródła te stwarzają gwarancje znacznie większych i wieloletnich dostaw niż dno oceaniczne.

Ogromne złoża rud miedzi w Polsce w utworach cechsztynu są już w dużej części wyczerpane i 3 kopalnie

Tab. 3. Zapotrzebowanie Polski na metale poszukiwane na dnie Atlantyku (wg Bilans, 2015 i KGHM)
Table 3. Poland's demand for metallic minerals explored on the seafloor of the Atlantic (acc. to Bilans, 2015 and KGHM data)

Metal *Metal*	**Zużycie [tys. t/rok]** *Consumption [thousand t/year]*		**Zapotrzebowanie hut krajowych na koncentrat [tys. t zawartego metalu]** *The needs for concentrate by domestic smelters [kt of metal content]*	**Wystarczalność [rok]** *Sufficiency [year]*
	Ogółem *Total*	Z rud importowanych *From imported ores*		
Zn	70–100	20–50**	140–190	2019
Cu	200–260	0	470	2045(2060+)*
Ag	do 0,1	>0,1	1,4	2045(2060+)*

* po zagospodarowaniu złoża Retków
** Polska jest od dawna dużym eksporterem cynku, ostatnio eksportuje od 85 do 135 tys. t/rok.
* after development of Retków deposit
** Poland has been a large exporter of zinc for years; recently the export has varied from 85,000 though 135,000 t/year

Tab. 4. Światowe lądowe zasoby metali poszukiwanych na dnie Atlantyku i ich wystarczalność statyczna (na podstawie danych USGS 2017)
Table 4. World land resources of metals explored on the seafloor of the Atlantic and their static sufficiency (based on the 2017 USGS data)

Metal *Metal*	**Zasoby przemysłowe (zawartego metalu)** *Production reserves (contained metal)*			**Zasoby geologiczne C_1-C_2** *Geologic resources C_1-C_2*	
	Ilość *Quantity*	Zużycie/rok *Consumption/year*	Wystarczalność/lata *Sufficiency/years*	Ilość *Quantity*	Wystarczalność/lata *Sufficiency/years*
Cu	790 Mt	20 Mt	40	2100 Mt	105
Zn	230 Mt	13 Mt	18	1900 Mt	140–150
Ag	530 kt	25 kt	21	by-produkt	duża
Au	54 kt	3,15 kt	17	15 kt	<5

będą sukcesywnie zamykane w latach 2025–2045. Wydobycie może być przedłużone w zredukowanej ilości do ok. 2060 r., jeśli nowe kopalnie Głogów Głęboki i Retków utrzymają zdolności produkcyjne w trudnej konkurencji międzynarodowej. Zakłady wzbogacania rud kopalń LGOM mają zdolność przerobową 33 mln t rudy na rok, a zużycie pozorne miedzi zawartej w koncentratach przez huty krajowe wynosi 440–470 tys. t. Pewne nadzieje na przedłużenie górnictwa miedzi w Polsce na dalsze lata dają wyniki rozpoznania łupków miedzionośnych na większych głębokościach (Oszczepalski i in., 2016, 2017).

Srebro pochodzi głównie z rafinacji miedzi i uzyskiwane ilości zależą od surowca źródłowego. Jego produkcja na przestrzeni ostatnich kilku lat wynosi ok. 1200 t. Zużycie srebra pierwotnego jest równe produkcji, a zdolność produkcyjna wydziału metali szlachetnych HM Głogów wynosi ok. 1400 t/rok. Niewielkie ilości srebra pochodzą z rud Zn-Pb.

Znane lądowe zasoby metali poszukiwanych na dnie Atlantyku (Cu, Zn, Ag) są w skali świata bardzo duże. Według danych USGS (2017) w czynnych kopalniach wystarczalność statyczna waha się od 17 lat dla złota do 40 lat dla miedzi. W sytuacji gwałtownego wzrostu cen, szybko mogą być uruchomione kopalnie odkrywkowe. Wystarczalność udokumentowanych zasobów rud cynku i miedzi wynosi ponad 100 lat (tab. 4). Złoto zajmuje tu wyjątkową pozycję, ale alternatywnych źródeł jego pozyskiwania jest wiele. Często podnoszony problem zapewnienia dostaw pierwiastków ziem rzadkich (REE) jest zdaniem autorów sztucznie wyolbrzymiany, bo ich zasoby są bardzo duże, zwłaszcza w złożach innych kopalin, z których są one pozyskiwane jako produkt uboczny (Paulo, Krzak, 2015; Wołkowicz i in., 2016). Paradoksalnie, zmonopolizowanie dostaw tych pierwiastków przez Chiny spowodowało lawinowe uruchomienie prac poszukiwawczych REE, udokumentowanie nowych złóż, czego efektem jest trwająca już kilka lat stabilizacja cen.

SPECYFIKA POSZUKIWAŃ I EKSPLOATACJI NA DNIE OCEANÓW

Regulacje prawne

Wszelkie działania na dnie mórz, w tym poszukiwanie i eksploatacja złóż mineralnych, są regulowane prawnie przez Konwencję Narodów Zjednoczonych o Prawie Morza (UNCLOS) z 1982 r., ratyfikowaną przez Polskę w 1998 r., i działającą na jej podstawie Międzynarodową Organizację Dna Morskiego (ISA). Ponadto problematyka zagospodarowania zasobów oceanicznych jest zawarta w deklaracji Szczytu Ziemi z Rio de Janeiro (1992) i Johannesburga (2002) oraz Programie Ochrony Środowiska Narodów Zjednoczonych (UNEP) realizowanym przez Międzynarodową Unię Ochrony Przyrody (IUCN). W Rio de Janeiro opracowano Konwencję o Różnorodności Biologicznej (CBD), którą wśród 193 państw ratyfikowała m.in. Polska.

Regulacje zagadnień tu omawianych są zawarte w Decyzji Zgromadzenia ISA (16. Sesji) dotyczącej zasad poszukiwań, rozpoznawania i oceny siarczków polimetalicznych w obszarze jurysdykcji międzynarodowej (ABNJ) z dnia 7.05.2010 r. (ISBA/16/A/12/Rev.1). Ponadto opracowano poradniki i rekomendacje odnośnie łagodzenia wpływu na środowisko oraz wykonywania raportów rocznych.

Regulacje odnośnie stadium eksploatacji wraz z oceną techniczno-ekonomiczną i dokumentami potrzebnymi do uzyskania koniecznych zezwoleń są jeszcze w opracowaniu.

Po pozytywnym rozpatrzeniu przez ISA wnioskodawca otrzymuje wyłączne prawo do rozpoznania złóż SMS na obszarze określonym w planie prac. Prawo to może być cofnięte, jeżeli nie zostaną spełnione warunki kontraktu. Kontraktor powinien stopniowo zwalniać bloki koncesyjne (10 × 10 km), tak by po 8 latach kontraktu zredukować obszar o co najmniej 50%, a po 10 latach o 75%, lecz mając możność zachowania do końca kontraktu działki o powierzchni 2500 km^2. Plan prac jest zatwierdzany na 15 lat i może być przedłużony do 20 lat.

W czerwcu 2018 r. Komisja Prawno-Techniczna ISA przedstawiła do dyskusji wstępne regulacje etapu eksploatacji (ISBA/24/LTC/WP.1), do których zostanie dodatkowo opracowany szablon dla oceny środowiskowej EIS (*Environmental Impact Statement*). Duże znaczenie mają tu dokumenty międzynarodowych ocen możliwości (*prefeasibilty*), wykonalności (*feasibility*) oraz pozwolenie środowiskowe. Regulacje te kończą się na dostarczeniu rudy na pokład statku pomocniczego oraz rekultywacji i monitorowaniu wyeksploatowanej działki.

Technologie

Większość rozwiązań technologicznych eksploatacji głębokowodnej opracowano dla złóż konkrecji manganowych, nieliczne dla naskorupień kobaltowych (Chung, 1996, 2009). Ze względu na odmienną budowę tych złóż i inne właściwości kopaliny systemy eksploatacji masywnych siarczków i podstawowy sprzęt muszą być inne (Van Wijk, Miedema, 2012; Verichev i in., 2014; Cherkashov, 2017; Zubkov i in., 2018).

Najłatwiej jest wykryć aktywne czarne kominy, lecz z wielu powodów nie są miejscami dogodnymi dla górnictwa: wysoka temperatura sięgająca 350–400°C, wysokie ciśnienie wypływu (kilkaset atmosfer), niezwykle kwaśne wody przy ujściu solfatar (pH w przedziale 1–3) i zawierające agresywny siarkowodór, znikoma widoczność w pobliżu ekshalacji. Ponadto są to obszary największego konfliktu ze światem żywym i prowadzenie tam działalności górniczej może unicestwić szanse rozwoju biotechnologii (Carrington, 2017). Zdaniem ekologów ujścia aktywnych czarnych kominów muszą być niedostępne dla górnictwa. Uważają, że ta „gorączka złota" wymaga ścisłej regulacji prawnej.

Istnieje zapotrzebowanie na nowe technologie i techniki. Ich rozwój wymaga czasu i nakładów finansowych. Będzie je można ulepszać na podstawie doświadczeń pilotażowych kopalń podmorskich, zapewne pojawią się patentowane rozwiązania. Na razie ukazują się informacje prasowe o zamiarach eksploatacji przez dwie firmy: kanadyjską Nautilus i rządową japońską, które chcą uruchomić wydobycie w latach 2019–2020. Trzeba tu wziąć pod uwagę wyjątkowo korzystne warunki na ich działkach: brak aktywności termalnej i związanej z nią agresywności środowiska oraz kilkakrotnie mniejszą głębokość. Tak więc obiekty pilotażowe mogą dostarczyć tylko wstępnych wskazówek, co więcej ujawnianie rozwiązań technologicznych z obszaru wyłącznych stref ekonomicznych nie jest prawnie wymagane. Doświadczenia tych firm będą miały ograniczoną przydatność dla polskiej kopalni w Grzbiecie Śródatlantyckim. Jeśli najpierw znajdziemy złoże.

Załóżmy jednak, że znaleźliśmy obiecujący obiekt. Trzeba go wielostronnie zbadać i udokumentować, ocenić przedsięwzięcie pod względem technologiczno-ekonomicznym (*studia opportunity*, *pre-feasibility, feasibility*) i środowiskowym (EIA, EIS), pokonać problemy prawne, uzyskać korzystne warunki finansowania itd. Mamy do dyspozycji obszar 10 tys. km^2 i koncesję ważną 15 lat. Czy w takim czasie na dziewiczej powierzchni, w warunkach braku oświetlenia, zdołalibyśmy zbadać porównywalny obszar na lądzie? Trzeba się spieszyć z wykorzystaniem licencji, bo po 15 latach pozostanie najwyżej 25 bloków koncesyjnych o powierzchni 2,5 tys. km^2.

Zbudowano już batyskafy i inne pojazdy głębokowodne zdalnie sterowane (ROV, AUV). Wypróbowano je m.in. przy kopaniu rowów do ułożenia kabli transoceanicznych. Dzięki modyfikacjom można nimi odłamać próbki, a nawet wiercić płytkie rdzeniowane otwory. Alternatywą jest wiercenie z podwodnych pływających platform. Istnieje sprzęt do kartowania i profilowania geologicznego dna (Nautilus, 2015). Zdjęcia o wysokiej rozdzielczości są przekazywane kablem światłowodowym do statku wyposażonego w łączność satelitarną i mogą być analizowane w odległym centrum badawczym. W miarę doskonalenia sprzętu wiertniczego z pewnością uda się sięgnąć kilkadziesiąt metrów w głąb dna, poprawić uzysk rdzenia i uniknąć wielokrotnego przeszacowania miąższości i zasięgu bocznego ciał rudnych oraz gęstości objętościowej, co zdarzało się podczas badania niektórych obiektów (Hannington i in., 2010). Nie budujemy jeszcze takich urządzeń w kraju, a jeden AUV i statek połączony z nim kablem z pewnością nie wystarczą do rozpoznania rozległego obszaru.

Gdy uda się odkryć odpowiednie złoże, można rozważyć urabianie rudy za pomocą kombajnu zaopatrzonego w kruszarkę lub zestawu, który będzie testował Nautilus. Zestaw ten obejmuje dwie potężne koparki i kruszarko-ładowarkę, każda o ciężarze 250 t i ogromnej mocy. Zawiesina rudna będzie transportowana hydraulicznie systemem pomp na statek. Tam powinno nastąpić odwodnienie i zawrócenie części zakwalifikowanej jako skała płona (MIT, 2016) albo tylko cieczy (Miller i in., 2018) z powrotem na dno. Wzbogacanie flotacyjne do koncentratu na statku nie jest celowe, gdyż trzeba by gromadzić odpadowy muł poflotacyjny z odczynnikami. Statek pomieści 180 osobową załogę. Wiele nowatorskich rozwiązań techniczno-technologicznych jest chronionych 20 patentami.

Nautilus przewiduje wydobycie 3200–4500 t rudy/dobę, tj. 1,0–1,5 mln t rocznie. Przy takiej zdolności wydobywczej modelowe złoże masywnych siarczków zostałoby wyczerpane w czasie 1–2 lat. Aby długotrwały proces geologiczno-górniczy skutkował wieloletnim zaopatrzeniem w surowce i znaczącym uzupełnieniem potrzeb kraju, konieczne jest ciągłe znajdowanie i zagospodarowanie wielu podmorskich złóż.

Problemy środowiskowe i prawne

Liczne przesłanki, doświadczenia górnictwa na szelfie i prace naukowe wskazują, że działalność wydobywcza w głębinach morskich, zwłaszcza w pobliżu gorących emanacji, spowoduje straty biologiczne. Biorąc pod uwagę ekstremalne warunki fizykochemiczne tam panujące, o których wspomniano powyżej, obszary te nie będą przedmiotem wykorzystania przemysłowego jeszcze przez wiele lat. Należy również podkreślić rosnący sprzeciw ekologów.

Ostatnio Międzynarodowa Unia Ochrony Przyrody (IUCN) przedstawiła ISA raport *Górnictwo głębokomorskie: rosnące wyzwanie dla środowiska* (IISD/SDG, 2018). Ostrzega on przed udzielaniem koncesji na obszarach zasiedlonych przez unikalne gatunki. Zwraca też uwagę na słabe jeszcze poznanie i zrozumienie zjawisk i procesów w basenach oceanicznych, zalecając studia funkcjonowania i regeneracji ekosystemów oraz przyjęcie regulaminowych zasad wykonywania OOŚ (EIA, EIS) na wysokim poziomie wraz z opracowaniem strategii łagodzenia nieodwracalnych szkód w środowisku morskim (Durden i in., 2018). Z zadowoleniem przejęto zalecenie przez ISA wykonywania regionalnych planów zarządzania środowiskiem i wydzielenia Obszarów o Szczególnym Znaczeniu dla Środowiska (API).

Apele Międzynarodowego Instytutu Rozwoju Zrównoważonego (IISD) i wielu innych organizacji podkreślają, że najbliższe lata dają społeczności międzynarodowej niepowtarzalną okazję opracowania regulacji prawnych dla oceanicznego przemysłu wydobywczego, zanim rozpocznie on działalność. Parlament Europejski podjął działania na rzecz porozumienia międzynarodowego w sprawie bioróżnorodności morskiej w obszarach oceanicznych poza jurysdykcją państw ABNJ (Hodgson i in., 2014).

Na wodach międzynarodowych rozwiązanie problemów środowiskowych przez górnictwo może się okazać trudniejsze niż w pojedynczych państwach. Tu nacisk ekologów na ochronę dziedzictwa ludzkości jest potężniejszy. Przy ONZ zawiązała się nieformalna grupa *ad hoc* do opracowania podstaw prawnych i instytucjonalnych zachowania i zrównoważonego wykorzystania bioróżnorodności w ABNJ. Polska powinna brać aktywny udział w

pracach tej grupy. ABNJ zajmują 64% powierzchni oceanów na naszym globie.

Parlament Europejski znaczną większością głosów uchwalił 16.01.2018 r. rezolucję, która opowiada się za powstrzymaniem wysiłków na rzecz wydobywania kopalin z dna morskiego do czasu ustalenia środowiskowych skutków industrializacji otwartego morza. Jednocześnie wezwał Komisję Europejską, aby przekonała państwa członkowskie do zaprzestania sponsorowania i udzielania koncesji na eksplorację i eksploatację dna morskiego na ABNJ, a także we własnych EEZ. Przepisy dotyczące eksploatacji dna morskiego były częścią większego przedsięwzięcia dotyczącego poprawy międzynarodowego zarządzania oceanami, w tym zwalczania zanieczyszczenia tworzywami sztucznymi, zmian klimatu, rybołówstwa, raf koralowych itp.

Zgodnie z rezolucją Parlament Europejski *wzywa Komisję i państwa członkowskie do poparcia międzynarodowego moratorium na komercyjne licencje na eksploatację głębin oceanicznych do czasu, gdy wpływ wydobycia głębinowego na środowisko morskie, różnorodność biologiczną i działalność człowieka na morzu zostaną zbadane w wystarczającym stopniu, a wszelkie możliwe zagrożenia będą zrozumiałe.*

Rezolucja ta nie ma wprawdzie mocy wiążącej, jest jednak dobitnym wyrazem sprzeciwu wobec rodzącej się idei industrializacji dna morskiego, procesu zarządzanego przez ISA, który w dużej mierze przebiega poza publiczną kontrolą (Woody, 2018).

Odkrycie niezwykłych organizmów i ekosystemów przy ujściu głębokomorskich źródeł hydrotermalnych spowodowało pobudzenie badań biologicznych tego niegościnnego na pozór środowiska, które może być analogiem pierwotnych warunków na naszej planecie oraz prymitywnych form życia spodziewanych na Marsie. Organizmy są w dużej mierze dotąd nieznane, bardzo różnorodne, wysoce zorganizowane i prymitywne, zdominowane przez rzadko występujące, a nawet endemiczne gatunki, i wyjątkowo powolne w regeneracji (Niner i in., 2018). Przystosowały się one do ekstremalnych warunków termicznych, ciśnienia, następstw trzęsień ziemi i erupcji wulkanów.

Poziom „akceptowalnej" utraty różnorodności biologicznej w głębokich morzach wymaga rozwagi oraz publicznej i przejrzystej profesjonalnej informacji, a także szerokiego porozumienia. Jeśli umowa zostanie zaakceptowana, konieczne będzie również dalsze uzgodnienie sposobu oceny pozostałych strat po solidnej realizacji hierarchii łagodzenia.

Regeneracja ekosystemu zakłóconego przez wydobycie w pojedynczym i małym wyrobisku górniczym zależy od tempa imigracji i kolonizacji przez larwy. Dąży się do zrozumienia procesów i dynamiki biologicznej. Jednakże przeważa pogląd, że duża skala eksploatacji i skumulowany wpływ kilku projektów wydobywczych w jednym regionie na zbiorowiska bentosowe, bez właściwego zarządzania, zagrażają wymieraniem fauny i zmianami w społecznościach korzystających z oceanów, czyli przeczą zasadzie zrównoważonego rozwoju (Van Dover, 2014; Dunn i in., 2014; 2018; Hodgson i in., 2014; ISA, 2018b; Niner i in., 2018).

Proponuje się utworzenie sieci obszarów ważnych ekologicznie, która pokryłaby 30–50% Grzbietu Śródatlantyckiego i podobnych obszarów ryftowych (Dunn i in., 2018). Sieć ta koincyduje z sektorem, na który Polska uzyskała koncesję w lutym 2018 r. (ISA, 2018a).

Trzeba się też liczyć z ewolucją prawa w innych dziedzinach i naciskiem społecznym organizacji naukowych, gospodarczych, technicznych, ekologicznych, które tworzą perspektywę zmian regulacji prawnych w niedalekiej przyszłości. Na razie pierwsze konflikty są już wyraźnie zarysowane, lecz doświadczeń z ich rozwiązywaniem jest niewiele, bo do maja 2018 r. zaledwie 7 państw (Chiny, Francja, Indie, Korea Pd., Niemcy, Polska i Rosja) zawarło niezbędne kontrakty z ISA na poszukiwania złóż masywnych siarczków. Wśród nich jako ostatnia znalazła się Polska. Trzy koncesje dotyczą dna Oceanu Atlantyckiego w strefie poza jurysdykcją poszczególnych państw i dla żadnego projektu w tej strefie nie wykonano jeszcze niezbędnej oceny oddziaływania na środowisko. Na obszarach EEZ państw nadmorskich do tej pory wydano już trzy zezwolenia na komercyjne wydobycie z dna morza. Jedno wystawił rząd Papui Nowej Gwinei, drugie rządy Arabii Saudyjskiej i Sudanu na dzielącym je Morzu Czerwonym, a trzecie rząd Japonii na złoże Zn-Cu-Au k. Okinawy. Na tym ostatnim podjęto w 2017 r. próbną eksploatację. W przypadku pomyślnego wyniku *feasibility study* i oceny środowiskowej w 2020 r. jest spodziewany początek wydobycia komercyjnego.

Pod wpływem przykładu Nautilusa i postępów w technologiach głębinowych państwa członkowskie ISA zwróciły się do Sekretariatu ISA z wnioskiem o przyspieszenie opracowania przepisów dotyczących ochrony środowiska, które regulowałyby kontrakty na eksploatację. Oczekiwano, że ostateczny projekt kodeksu regulacyjnego zostanie przedstawiony w 2017 r., a formalne zatwierdzenie przez Zgromadzenie ISA nastąpi nie wcześniej niż w 2018 r. (Nautilus, 2018a).

Ocena kosztów i czasu realizacji

Koszty poszukiwań i rozpoznania można wstępnie oszacować na podstawie opłat obowiązujących w ISA. Trudniej ocenić skuteczność i czas eksploracji, a zwłaszcza koszty etapu wydobycia rudy i produkcji surowców.

PRoGeO jest szerokim programem badań wszystkich typów mineralizacji zarządzanych przez ISA, jednakże w swoich wypowiedziach GGK kładzie nacisk na złoża siarczków na dnie Atlantyku. Wniesienie opłaty rejestracyjnej 0,5 mln USD warunkowało pozytywne rozpatrzenie wniosku o przydział określonej strefy wyłącznych działań eksploracyjnych, a docelowo wydobywczych.

Wynajęcie statku oceanograficznego ze specjalistycznym sprzętem i jego obsługą kosztuje 50 tys. EUR za dzień roboczy. W ciągu doby może on przebadać ok. 10 km^2 lub więcej zależnie od gęstości logów i ilości współpracujących ROV oraz autonomicznych robotów (AUV), może pobrać 4 próbki z dna, a także wykonywać wiercenia do głębokości 20–30 m i szereg pomiarów geofizycznych oraz Eh. W przypadku poszukiwania złóż częściowo zakrytych, które są obecnie uważane za najbardziej perspektywiczne w strefie powolnego spreadingu, używa się obecnie wielozadaniowych robotów zdolnych do kartowania z odpowiednią rozdzielczością (0,5–2 m) obszaru zaledwie 47 km^2 w ciągu jednego rejsu (Petersen i in., 2018). Skartowanie w ten sposób całego obszaru działki 10 tys. km^2 byłoby zbyt kosztowne, należy się jednak liczyć z rozwojem tanich

technologii i stosowaniem AUV na wydzielonych parcelach badań szczegółowych. W czasie 5 lat realizacji I etapu poszukiwań zakładamy 3 rejsy 30–dniowe, co przekłada się na koszt 5 mln USD. W tej kwocie mieści się szczegółowy raport z badań.

Analiza próbek kontrolnych i wyników różnorodnych badań dużego obszaru 10 tys. km^2 wymaga zaangażowania do intensywnych studiów wielu pracowników i nakładów rzędu 1,5 mln USD.

Po 5 latach należy przedstawić plan rozpoznania wybranego obszaru 5000 km^2. Rozpoznanie będzie wymagało 2–3 rejsów badawczych, prawdopodobnie w kilku klastrach. Spodziewany koszt wraz z badaniami wspierającymi na lądzie to 5 mln USD. Można założyć, że na tym etapie będzie odkryty co najmniej jeden obiecujący obiekt złożowy, co zmniejszy czas wynajmu statku w celu szczegółowego rozpoznania do 30 dni w III etapie i koszt ogólny do 3 mln USD. Odkrycie kilku obiektów będzie wymagało zwiększenia zakresu prac i większych kosztów.

Zatem po 15 latach intensywnych prac powinniśmy posiadać dokumentację złoża spełniającą standardy międzynarodowe, przekazać wyniki do ISA, a następnie dopracować się technicznego sposobu wydobycia, pionierskiego projektu zagospodarowania złoża, certyfikowanej przez IUCN oceny oddziaływania na środowisko, analiz opłacalności ekonomicznej, analizy ryzyka i wykonalności projektu górniczego oraz rekultywacji. Na tej podstawie będą dobierane odpowiednie maszyny, środki transportu, negocjowane będą z bankami możliwie najdogodniejsze warunki kredytowania niezwykle kosztownych prac górniczych, przeróbczych i ewentualnie metalurgicznych.

Szacowania kosztów eksploatacji i produkcji surowców mineralnych można dokonać na podstawie pierwszych zaawansowanych projektów górniczych: Solwara 1 (Nautilus, 2018b) i Okinawa (Kyodo, 2017). Trzeba jednak zastrzec, że podobieństwa do polskiej strefy na Atlantyku są ograniczone. Obydwa projekty dotyczą strefy EEZ, znajdują się ponad dwukrotnie płycej i są znacznie bogatsze, położone blisko odbiorców, a przede wszystkim zostały odkryte przypadkiem, więc nie tracono czasu i środków na poszukiwanie.

Nautilus w początkowej fazie poniósł łączne nakłady kapitałowe 413 mln USD na wydobycie i transport urobku (Cardno, 2016). Kwota ta nie obejmuje kosztu eksploracji i ocen, które trwały ok. 30 lat, co skutkuje długotrwałym zamrożeniem kapitału i wielokrotnym wzrostem realnych kosztów. W roku 2018 trzeba było wydatkować 243 mln USD na budowę statku i inny sprzęt, czyli nakłady inwestycyjne wynoszą, co najmniej 656 mln USD. Wzbogacanie i wytop nastąpi w Chinach, co zmniejsza obciążenie inwestycyjne, ale spowoduje mniejszy przychód, gdyż cena rudy jest znacznie niższa od ceny metalu. Przedsiębiorstwo znalazło się w krytycznej sytuacji, ponieważ ceny akcji od pewnego czasu spadają. Mają temu zaradzić optymistyczne doniesienia firmy o rychłym rozpoczęciu produkcji (w 2019 r.) i korzystnych wskaźnikach ekonomicznych fazy produkcyjnej. Według bieżącego raportu finansowego (Nautilus, 2018b) niezdyskontowany strumień finansowy netto (po opodatkowaniu) ma wynieść 179 mln USD, przy stopie dyskontowej 15% i wewnętrznej stopie zwrotu (IRR) 28%. Tak dobre wskaźniki są pochodną wyjątkowo wysokiej zawartości miedzi i złota. Koszty operacyjne będą się obniżać z 3000 do 1760 USD/t po osiągnięciu pełnej mocy produkcyjnej (4500 t/d). Uczyni to kopalnię Solwara 1 bardzo konkurencyjną, lecz tylko na okres 1–2 lat, bo na tyle wystarczy zasobów. Kiedy sytuacja ekonomiczna poprawi się, trzeba będzie pospiesznie znaleźć i przygotować do eksploatacji nowe złoże. Będzie w nim można wykorzystać dotychczasowy sprzęt, jeśli okaże się niezawodny.

Projekt japońskiej agencji JOGMEC (*Japan Oil, Gas and Metal Corporation*) przewiduje eksploatację wyjątkowo bogatego złoża masywnych siarczków Zn (Ag-Au) w Izena Hole w pobliżu Okinawy. Występuje ono na głębokości 1300–1600 m (Yoshizumi i in., 2015). Próbną eksploatację przeprowadzono w drugiej połowie sierpnia 2017 r. Japońskie ministerstwo gospodarki wyraziło nadzieję, że złoże to ma zasoby odpowiadające rocznemu zapotrzebowaniu kraju, co można szacować na ok. 0,5 mln t. Wydobycie przemysłowe ma się rozpocząć w 2020 r. (Kyodo, 2017).

Te dwa przykłady cząstkowych nakładów na zagospodarowanie siarczkowych złóż polimetalicznych na dnie oceanu wskazują, że koszty ogólne muszą być wyższe od nakładów na eksploatację złóż naziemnych. Jest to ogólna prawidłowość. Podobnie dzieje się w przypadku złóż węglowodorów, których eksploatacja w morzu jest nawet o 50% i więcej droższa od wydobycia lądowego. Hannington i Petersen (2016) szacują, że koszty wydobycia polimetalicznych siarczków z dna oceanów mogą być nawet 10-krotnie wyższe. Wprawdzie inwestycje w kopalnie odkrywkowe miedzi kosztują nieraz ponad 1 mld USD (Strzelska-Smakowska, 2003), to jednak zapewniają duże dostawy rudy lub miedzi katodowej przez dziesiątki lat. Przeciwnie, złoża SMS są z natury małe, a łatwe do odkrycia aktywne kominy hydrotermalne są bardzo małe i ze względów ekologicznych również nie kwalifikują się do wydobycia. Okres zaopatrzenia ze złoża o zasobach 2–3 mln t można szacować na 2 lata. Największe, odkryte dotąd złoże SMS na Atlantyku (TAG Mound) ma średnicę 200 m, wysokość 45 m i zasoby 2,7 mln t rudy (Hannington i in., 2011), a w skali świata zasoby największego wstępnie rozpoznanego złoża Bent Hill na Pacyfiku mogą przewyższać 9 mln t (Zierenberg i in., 1998; Jamieson i in., 2014). Gdybyśmy na takie złoże trafili, wystarczyłoby ono na 5 lat i zaspokoiłoby tylko część zapotrzebowania krajowego. Zwykle natrafia się jednak na obiekty o powierzchni mniejszej od 0,5 ha, które nie są atrakyjne dla przemysłu. Bardzo niewiele, mniej niż 1% odkrywanych przejawów mineralizacji SMS, znajduje zainteresowanie przemysłu jako potencjalna kopalina (Hannington, Petersen, 2016). Na podstawie odkryć do roku 2011 oceniano, że średnia odległość między potencjalnymi złożami SMS wynosi 107 km (Hannington i in., 2011), co oznaczałoby szansę na znalezienie 9 złóż w naszym sektorze MAR.

Koszt poszukiwania i udokumentowania złoża będzie się mieścił w granicach 20–30 mln USD, a eksploatacja złoża pochłonie ok. 1 mld USD. Na tym etapie szacowania kosztów można zrezygnować z wyceny niebagatelnych kosztów wzbogacania i przetwarzania metalurgicznego, jeśli dopuszczamy wariant sprzedaży rudy, a nie produktu o wartości dodanej (koncentratu lub metalu rafinowanego). Biorąc natomiast pod uwagę dotychczasowe doświadczenia, można założyć z dużym prawdopodobieństwem, że okres zamrożenia kapitału będzie się wahał pomiędzy 20 a 30 lat. W szacowaniu finansowym należy jednak uwzględnić mniejsze przychody z ewentualnej sprzedaży nieprzetworzonego koncentratu lub osuszonego miału rudnego.

W różnych regionach świata ceny standardowych koncentratów miedzi stanowią 65–75% miedzi rafinowanej na LME, a ceny koncentratów selektywnych cynku tylko 50% ceny giełdowej metalu (Strzelska-Smakowska, 2003). Rudy są rzadko przedmiotem obrotu handlowego, transportuje się je do przeróbki na krótkie dystanse, na lądzie do 15, wyjątkowo do 50 km. Wyceniane są na podstawie współczynnika wzbogacania i mają ok. 10-krotnie niższą wartość jednostkową od koncentratu. Szczegóły są ustalane w indywidualnych kontraktach z nabywcą.

Należy też mieć na uwadze to, że znalezienie jednego czy dwóch złóż zapewni zaopatrzenie w specyficzną kopalinę tylko przez 2–4 lata i trzeba będzie prowadzić intensywne poszukiwania kolejnych obiektów, jeśli nie na tym samym, to na nowym obszarze koncesyjnym. Nie ma szans na zwrot kapitału przez krótkotrwałą inwestycję.

Można sięgnąć do ocen inwestycji na obszarach administrowanych przez ISA. Studium Bellagio (ISA, 2015) zwraca uwagę na ryzyko współczesnych projektów podmorskich i wylicza jego powody. Długi czas poszukiwań i dochodzenia do wydobycia powoduje, że nakłady w tej fazie tworzą „koszty utopione". Ryzyko jest większe przez doświadczalną technologię, nieznane jeszcze straty zasobów w trakcie wydobycia i wzbogacania, trudny do oceny wpływ na środowisko, niesfinalizowane dotąd prace nad regulacjami finansowymi, m.in. opłatami środowiskowymi. Tych powodów jest znacznie więcej.

W studium publikacji na temat kosztów eksploatacji złóż typu SMS przytacza się obecne koszty ok. 1 mld USD (Cuyvers i in., 2018), tj. znacznie wyższe od ocen wstępnych. W pracy tej zwraca się również uwagę na to, że nakłady kapitałowe i jednostkowe koszty operacyjne kopalni oceanicznej będą mniej atrakcyjne niż w przypadku pozyskiwania z innych źródeł. W porównaniach do wcześniejszych ocen trzeba brać pod uwagę deprecjację walut. Przykładowo, koszty wyliczone w dolarach z 1976 r. należałoby pomnożyć przez 4,44, co w konkretnym złożu konkrecji manganowych na Pacyfiku powoduje automatyczny wzrost z 560 mln do 2500 mln USD. Obecnie urealniono następująco koszty wydobycia z tego złoża w tempie 3 mln t konkrecji na rok (Van Nijen i in., 2018; wszystkie liczby w milionach USD): badania – 360, urządzenia wydobywcze i statki – 1276, zakład przeróbczy – 2415, czyli łączne nakłady kapitałowe ok. 4 mld USD, a koszty operacyjne 0,6–1,1 mld/rok. Trzeba zaznaczyć, że te oceny nie uwzględniają dodatkowych nakładów na rekultywację i łagodzenie skutków górnictwa, doradztwa naukowego, technicznego i środowiskowego, ubezpieczeń, finansowania konsultacji społecznych itp.

Istnieją również koszty ponoszone przez społeczność międzynarodową, których nie umiemy policzyć. Są to przede wszystkim koszty degradacji środowiska przez górnictwo podmorskie, degradacji endemicznych gatunków, zniszczenia ekosystemów, zmniejszenia sekwestracji CO_2 (Van Dover i in., 2017; Niner i in., 2018). Ekolodzy postulują wprowadzenie opłaty środowiskowej do regulacji ISA.

Spodziewane są oczywiście korzyści z eksploatacji złóż podmorskich zarówno dla inwestorów, jak i szerszych kręgów ludzkości. Miernikami opłacalności inwestycji górniczych są przede wszystkim wewnętrzna stopa zwrotu (IRR) i okres zwrotu nakładów inwestycyjnych (PBP). W projektach górnictwa lądowego zakłada się na ogół dolną granicę IRR na 15%, a w bardziej ryzykownych inwestycjach podmorskich 18% i więcej. Istnieje również dodatkowa niepewność związana z przyszłymi cenami metalu. PBP powinien być możliwie najkrótszy, w inwestycjach obarczonych dużym ryzykiem to 3–5 lat. Trudno jest przypuszczać, że w okresie 20–30 lat działalności poszukiwawczej i górniczej uzyskamy zwrot nakładów, a tym bardziej, że inwestycja przyniesie zysk dla koncesjonobiorcy. Można się jednak spodziewać zysków dla producentów specjalistycznych maszyn, armatorów statków, zakładów przeróbczych i hut. Przybędzie miejsc pracy.

Jak może skorzystać społeczność międzynarodowa? Oczekuje się, że jeśli należności od koncesjonobiorców wpłyną do ISA, to będzie ona mogła zbilansować koszty administracyjne i rozdzielić ewentualną nadwyżkę wśród członków ONZ, zgodnie z konwencją Prawa Morza. Uzgodnienie zasad podziału jest jednak trudne, tym bardziej, że opłacalność inwestycji zależy w dużej mierze od cen rynkowych metali.

PODSUMOWANIE

Wydobycie kopalin z międzynarodowego obszaru dna Atlantyku jest przedsięwzięciem bez precedensu i kontrowersyjnym. Z jednej strony jest spektakularnym podjęciem wyzwania projektowego i technicznego w grupie kilku państw pionierskich, a z drugiej – nierokującym sukcesu finansowego projektem geologiczno-górniczym. Wizja znaczącego zaopatrzenia gospodarki narodowej w surowce mineralne z zakontraktowanego obszaru koncesyjnego jest nierealna. Na obszarze tym można znaleźć jedynie małe złoża siarczków miedzi i cynku z domieszkami srebra oraz złota. Nie ma też zagrożenia załamaniem rynku dostaw wymienionych metali.

Z niewiadomego powodu skromne środki finansowe mają być rozproszone na poszukiwania małych złóż siarczków na Atlantyku zamiast przeznaczone na przygotowanie techniczne do wydobycia i przetwarzania rozpoznanych już ogromnych złóż konkrecji manganowych na Pacyfiku. W przeciwieństwie do siarczków miedzi, cynku i srebra, których dostawy zabezpieczają posiadane kopalnie, Polska jest zmuszona do importu manganu, kobaltu i niklu dla przemysłu stalowego, gdyż nie posiada odpowiednich złóż.

Doświadczenia wieloletnich poszukiwań złóż głębokomorskich kobaltu, niklu, miedzi w konkrecjach manganowych i prób eksploatacji na Pacyfiku w ramach Interoceanmetal będą mało przydatne do badań, a przede wszystkim eksploatacji innego typu złoża. Polska nie dysponuje specyficznym sprzętem i kadrą specjalistyczną. Liczebność zespołów pracujących w Polsce nad tą problematyką (Szamałek, 2018a) jest nie większa niż kilkanaście osób. Podejmujemy pionierską, lecz niezwykle ryzykowną i kosztowną inwestycję, mimo braku sukcesu lepiej przygotowanych i bogatszych krajów. Ponadto docelowe wydobycie w strefie MAR otworzy pole konfliktu z międzynarodową społecznością ekologów. Wskazana jest rozwaga, transparentność działań, popularyzacja problemów eksploracji podmorskiej i uzyskanie akceptacji społecznej.

Autorzy artykułu są bardzo dalecy od negowania konieczności prowadzenia prac badawczych o charakterze podstawowym. Wręcz przeciwnie: badania takie należy prowadzić, nawet jeśli cel ekonomiczny jest bardzo odległy w czasie i mgliście zarysowany. Bardzo dobrym przykładem tego typu prac realizowanych przez polskich nau-

kowców są badania polarne. Jednakże prace te powinny być prowadzone w oparciu o poważne naukowe projekty badawcze podlegające ewaluacji. Z uwagi na pionierski charakter takiego programu oraz jego wieloletnią realizację (15 lat) może mieć formę programu rządowego, tak jak PRoGeO, ale sposób jego przygotowania i oceny nie powinien odbiegać od standardów dla poważnych grantów badawczych, a więc powinien mieć autorski charakter, być przygotowany przez wiodące w danej dziedzinie ośrodki naukowe i poddany gruntownej ocenie przez niezależnych ekspertów. Wówczas będzie możliwa szeroka dyskusja w środowisku naukowym co do celowości, zakresu i kosztów prac. Prawidłowe oszacowanie kosztów jest niezwykle istotne. Wprawdzie kwota, która została zapisana na realizację programu PRoGeO – 530 mln zł, wydaje się szokująca, to biorąc pod uwagę 15-letni okres realizacji i w porównaniu do kosztów prac badawczych wskazanych w tym artykule, jest ona i tak zdumiewająco mała, średnio ok. 8,25 mln EUR/rok. Trudno zakładać, że na etapie eksploracji i ocen, które będą trwały co najmniej 20 lat, będziemy dostarczać z Atlantyku znaczącą ilości surowców oraz, że koszt ich pozyskania będzie konkurencyjny do złóż lądowych.

Z przedstawionej analizy surowcowej wynika, że nie ma w obecnej sytuacji gospodarczej Polski realnej potrzeby sięgania po zasoby surowców mineralnych zalegających w oceanach, natomiast istnieje pilna potrzeba realistycznego spojrzenia na to, w jakim zakresie Polska powinna się w te badania włączyć.

Autorzy dziękują serdecznie prof. Ryszardowi Kotlińskiemu za krytyczne uwagi i owocną dyskusję w trakcie Kongresu Surowcowego, który miał miejsce w Rytrze (20–23.11.2018), oraz prof. Krzysztofowi Szamałkowi za wnikliwą recezję tekstu. Artykuł został przygotowany w ramach tematu PSP *Wsparcie działań Głównego Geologa Kraju w zakresie prowadzenia Polityki Surowcowej Państwa,* nr 22.4000.1701 realizowanego przez PIG-PIB, oraz badań statutowych AGH nr 11.11.140.626.

LITERATURA

BILANS 2015 – Bilans gospodarki surowcami mineralnymi Polski i świata 2013. IGSMiE PAN, Państw. Inst. Geol., Warszawa 2015.

BEAULIEU S.E., BAKER E.T., GERMAN C.R. 2015 – Where are the undiscovered hydrothermal vents on oceanic spreading ridges? Deep Sea Res. Part II., 121: 202–212.

BIRNEY K., GRIFFIN A., GWIAZDA J., KAFAUVER J., NAGAI T., VARCHOL D. 2007 – Potential Deep Sea Mining of Seafloor Massive Sulphides: A case study in Papua New Guinea. https://www.bren.uscb.edu/research/document/VentsThesis.pdf

CARDNO 2016 – An assessment of the costs and benefits of mining deep-sea minerals in the Pacific Island Region. Deep-sea Mining Cost-Benefit Analysis. Pacific Community, Suva, Fiji.

CARRINGTON D. 2017 – Is deep sea mining vital for a greener future – even if it destroys ecosystems? The Guardian, 4.06.2017.

CHERKASHOV G. 2017 – Seaflor Massive Sulphide Deposits: Distribution and Prospecting [W:] Sharma R. (red.), Deep Sea Mining, Resource Potential. Tech. Environ. Considerat.: 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. Marine Geores. Geotech., 28: 222–239.

CHILMON J., 2018 – Przyszłość górnictwa oceanicznego. Polityka Surowcowa, 1: 22–25.

CHUNG J.S. 1996 – Deep-Ocean Mining: Technologies for Manganese Nodules and Crusts. Inter. J. Off. Pol. Eng., ISOPE 6 (4): 244–254.

CHUNG J.S. 2009 – Deep-Ocean Mining Technology III: Developments. Proceedings of the Eighth ISOPE Ocean Mining Symposium, Chennai, India: 1–7

COFFEY 2008. Environmental Impact Statement Nautilus Minerals Niugini Ltd. Solwara 1 Project Executive Summary. Coffey Natural Systems.

COX D.P., SINGER D.A. 1986 – Mineral deposit models. USGS Bulletin 1693.

CUYVERS L. BERRY W., GJERDE K.M., THIELE T., WILHEM C. 2018 – Deep seabed mining: a rising environmental challenge. Gland, Switzerland. IUCN and Gallifrey Foundation.

DUNN D.C., ANDRON J., BAX N., BERNAL P., CLEARY J. CRESWELL I. DONNELLY B., DUNSTAN P., GJERDE K., JOHNSON D., KASCHNER K., LASCELLES B., RICE J., VON NORDHEIM H., WOOD L., HELPIN P.N. 2014 – The Convention on Biological Diversity's Ecologically or Biologically Significant Areas: Origins, development and current status. Marine Policy, 49: 137–145.

DUNN D.C., VAN DOVER C.L., ETTER R. J., SMITH C.R., LEVIN L.A., MORATO T. 2018 – A strategy for the conservation of biodiversity on mid-ocean ridges from deep-sea mining. Sci. Advan., 4 (7): 4313.

DURDEN J.M., LALLIER L.E., MURPHY K., JAECKEL A., GJERDE K., DANIEL O.B. JONES D.O.B. 2018 – Environmental Impact Assessment process for deep-sea mining in 'the Area'. Marine Policy, 87: 194–202.

GERMAN C.R., PETERSEN S., HANNINGTON M.D. 2016 – Hydrothermal exploration of mid-ocean ridges: Where might the largest sulfide deposits be forming? Chem. Geol., 420: 114–126.

GOLDER ASSOCIATES 2012 – Mineral resource estimate Solwara Project, Bismarck Sea, PNG. Technical Report compiled under NI43-101 for Nautilus Minerals Nuigini Limited.

HANNINGTON M., MONECKE T. 2009 – Global exploration models for polymetallic sulphides in the Area: An assessment of lease block selection under the Draft Regulations on Prospecting and Exploration for Polymetallic Sulphides. Mar. Geores. Geotech., 27 (2): 132–159.

HANNINGTON M., JAMIESON J., MONECKE T., PETERSEN S. 2010 – Modern Sea-Floor Massive Sulfides and Base Metal Resources: Toward an Estimate of Global Sea-Floor Massive Sulfide Potential. Econom. Geol. Spec. Publ., 15: 317–338.

HANNINGTON M., JAMIESON J., MONECKE T., PETERSEN S., BEAULIEU S. 2011 – The abundance of seafloor massive sulphide deposits. Geology, 39 (12): 1155–1158.

HANNINGTON M., PETERSEN S. 2016 – A discussion paper on marine minerals. National Ocean Exploration Forum, October 20–21; https://oceanexplorer.noaa.gov/national-forum/media

HOAGLAND P., BEAULIEU S., TIVEY M.A., EGGERT R.G., GERMAN CH., GLOWKA L., LIN J. 2010 – Deep-sea mining of seafloor massive sulfides. Marine Policy, 34: 728–732.

HODGSON S., SERDY A., PAYNE I., GILLE J. 2014 – Towards a Possible International Agreement on Marine Biodiversity in Areas Beyond National Jurisdiction. European Parliament. IP/A/ENVI/2014-04.

IISD/SDG 2018. Benson Wahlén C. IUCN Calls for Knowledge and Caution as ISA Meets; http://sdg.iisd.org/news/iucn-calls-for-knowledge-and-caution-as-isa-meets/

INNIS L., SIMCOCK A. (coord.) 2016 – The First Global Integrated Marine Assessment. World Ocean Assessment I. United Nations.

ISA 2015 – Deep seabed mining fiscal framework. www.resolv.org/site-dsm/files/2016/09/ Bellagio-Fiscal-Framework-WG-161115-Final.pdf

ISA 2018a – International Seabed Authority Exploration Areas. Seabed technology; www.isa.org.jm/contractors/exploration-areas, www.isa.org.jm/documents-resources/publications

ISA 2018b – Preliminary strategy for the development of regional management plans for the Area. International Seabed Authority ISBA/24/C/3.

ISBA/16/A/12 Rev.1. 2010. Decision of the Assembly of the International Seabed Authority relating to the regulations on prospecting and exploration for polymetallic sulphides in the Area.

JAMIESON J.W., CLAGUE D,A., HANNINGTON M.D. 2014 – Hydrothermal sulphide accumulation along the Endeavour Segment, Juan de Fuca Ridge. Earth Planet. Sci. Lett., 395: 136–148.

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 (8): 535–539.

KOTLIŃSKI R. 1999 – Metallogenesis of the world's ocean against the background of the oceanic crust evolution. Polish Geol. Inst. Spec. Paper, 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: 1–7.

KOTLIŃSKI R., SZAMAŁEK K.(red.) 1998 – Surowce mineralne mórz i oceanów. Wyd. Nauk. Scholar, Warszawa, s. 384.

KYODO 2017 – Japan successfully undertakes large-scale deep-sea mineral extraction. Japan Times 26.09.2017. https://www.japantimes.co.jp/news/2017/09/26/national/japan-successfully-undertakes-large-scale-deep-sea-mineral-extraction/#.XDRG4P3xLIV

LUICK J.L. 2012 – Physical Oceanographic Assessment of the Nautilus EIS for the Solwara 1 Project. Deep Sea Mining Campaign. 27 p; www.deepseaminingoutofourdepth.org
MALON A., TYMIŃSKI M., MIKULSKI S., OSZCZEPALSKI S. 2018 – Surowce metaliczne. Rudy miedzi i srebra. [W:] Szuflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.), Bilans zasobów kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2017.
MILLER K.A., THOMPSON K.F., JOHNSTON P., SANTILLO D. 2018 – An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps. Frontiers in Marine Science; https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00418
MIT 2016 – Analyzing the promise of Deep Sea Mining. http://web.mit.edu/12.000/www/m2016/finalwebsite/solutions/oceans.html
NAUTILUS 2015 – The tools of ocean exploration. www.nautilusliveorg/tech
NAUTILUS 2018a – Seabed Mining. The Ocean Foundation. 18.01.2018.
NAUTILUS 2018b – Nautilus announces Preliminary Economic Assessment for its Solwara 1 Project. Press Release 2018-11 (27.02.2018).
NINER H.J., ARDRON J.A., ESCOBAR E.G., GIANNI M, JAECKEL A., JONES D.O.B., LEVIN L.A, SMITH C.R., THIELE T., TURNER P.J., VAN DOVER C.L., WATLING L., GJERDE K.M. 2018 – Deep-Sea Mining With No Net Loss of Biodiversity – An Impossible Aim. Frontiers in Marine Sci., 5: 1–12.
OSZCZEPALSKI S., SPECZIK S., MAŁECKA K., CHMIELEWSKI A. 2016 – Prospective copper resources in Poland. Gos. Surow. Mineral., 32 (2): 5–30.
OSZCZEPALSKI S., CHMIELEWSKI A., SPECZIK S. 2017 – Zmienność mineralizacji kruszcowej w rejonie północno-zachodniego przedłużenia złoża Lubin-Sieroszowice. Biuletyn Państw. Inst. Geol., 468: 109–142.
PAULO A. KRZAK M. 2015 – Metale rzadkie. Wydawnictwa AGH.
PAULO A., STRZELSKA-SMAKOWSKA B. 2000 – Rudy metali nieżelaznych i szlachetnych. Wyd. AGH Kraków.
PAULO A., WNUK R. 2015 – Kopalnia rud cynku i ołowiu Pomorzany skończyła 40 lat – jak długo jeszcze wystarczy jej zasobów? Prz. Geol., 63: 1483–1490.
PETERSEN S., HANNINGTON M., KRÄTSCHELL A. 2017 – Technology developments in the exploration and evaluation of deep-sea mineral resources. Annales des Mines, 85: 14–18.
PETERSEN S., LEHRMANN B., MURTON B.J. 2018 - Modern seafloor hydrothermal systems: new perspectives on ancient ore-forming processes. Elements, 14: 307–312.
PRZYBYLSKI R. 2018 – Wydobycie z dna morskiego będzie uzupełniające. Polityka Surowcowa, 1: 28–29.
PUBLIC REPORT. Blue Mining. Breakthrough Solutions for Mineral Extraction and Processing in Extreme Environments 2018; http://www.bluemining.eu/download/project_results/public_reports/Blue-mining-Public-Report-2018.pdf
SHANKS W.C.P., THURSTON R. (red.) 2012 – Volcanogenic massive sulfide occurrence model. Scientific Investigations Report 2010-5070-C. USGS Reston.
STRZELSKA-SMAKOWSKA B. 2003 – Ocena ekonomiczna złóż rud. Wyd. AGH, Kraków.
SZAMAŁEK K. 2011 – Surowce mineralne z dna mórz i oceanów – stan rozpoznania i perspektywy. Górnictwo, Geoinżynieria, 35 (4/1): 353–370.
SZAMAŁEK K. 2018a – Stan rozpoznania oceanicznych zasobów mineralnych. Prz. Geol., 66 (3): 189–194.
SZAMAŁEK K. 2018b – Udział Polski w pracach Międzynarodowej Organizacji Dna Morskiego. Prz. Geol., 66 (3): 185–188.
TAKAYA Y., YASUKAWA K., KAWASAKI T., FUJINAGA K., OHTA J., USUI Y., NAKAMURA K., KIMURA J-I., CHANG Q., HAMADA M., DODBIBA G., NOZAKI T., IIJIMA K., MORISAWA T., KUWAHARA T., ISHIDA Y., ICHIMURA T., KITAZUME M., FUJITA T., KATO Y. 2018 – The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements. Scientific Reports; www.nature.com/scientificreports
USGS 2017 – Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
UCHWAŁA 2017 – Uchwała RM z dn. 25 lipca 2017 r. w sprawie ustanowienia wieloletniego programu „Program Rozpoznania Geologicznego Oceanów" – PRoGeO; http://monitorpolski.gov.pl/mp/2017/774
VAN DOVER C.L. 2014 – Impacts of anthropogenic disturbances at deep-sea hydrothermal vent ecosystems: a review. Marin. Environ. Res., 102: 59–72.
VAN DOVER C.L., ARDRON J. A., ESCOBAR E., GIANNI M., GJERDE K. M., JAECKEL A., JONES D.O.B., LEVIN L.A., NINER H.J., PENDLETON L., SMITH C.R., THIELE T., TURNER P.J., WATLING L., WEAVER P.P.E. 2017 – Biodiversity loss from deep-sea mining. Nat. Geosci., 10: 464–465.
VAN NIJEN K., VAN PASSEL S., SQUIRES D. 2018 – A stochastic techno-economic assessment of seabed mining of polymetallic nodules in the Clarion Clipperton Fracture Zone. Marine Policy. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.02.027
VAN WIJK J.M., MIEDEMA S.A. 2012 – Deep Sea Mining Technologies. Sea Technology, 1.
VERICHEV S., DE JONGE L., BOOMSMA W., NORMAN R. 2014 – Deep sea mining: from exploration to exploitation. Int. Conf. Minerals of the ocean – 7 & Deep-sea minerals and mining – 4 at St. Petersburg: 126–137.
WOŁKOWICZ S., PAULO A., KRZAK M. 2016 – The role of geochemical and mineralogical studies in the research of rare earth elements deposits: Polish and world experiences. Mineral. Spec. Pap., 46: 61–63. VIII Polish Conference, Kraków.
WOODY T. 2018 – European Parliament Calls for a Moratorium on Deep-Sea Mining. Ocean Deeply, 1.02.2018.
YOSHIZUMI R., MIYOSHI Y., ISHIBASHI J. 2015 – The characteristics of the seafloor massive sulfide deposits at the Hakurei site in the Izena Hole, the Middle Okinawa Trough. [W:] Ishibashi et al. (red.) Subseafloor biosphere linked to hydrothermal systems: TAIGA Concept: 561–565.
ZIERENBERG R.A. et al. (27 coauthors) 1998 – The deep structure of sea-floor hydrothermal deposit. Nature, 392: 485–488.
ZUBKOV M.V., PLUCINSKI P.K., DARTIGUELONGUE A.C.Y., LUSTY P.A.J. 2018 – Metal extraction from deep-ocean mineral deposits. Elements, 14: 319–324.

Praca wpłynęła do redakcji 31.12.2018 r.
Akceptowano do druku 16.01.2019 r.