

*Tomasz Abramowski**, *Ryszard A. Kotliński***

WSPÓŁCZESNE WYZWANIA EKSPLOATACJI OCEANICZNYCH KOPALIN POLIMETALICZNYCH

1. Wprowadzenie

Utrzymujący się dynamiczny przyrost ludności świata stwarza nowe wyzwania, które mogą być rozwiązywane w nadchodzącym stuleciu, w ramach działań o zasięgu globalnym. Według umiarkowanych prognoz w 2050 r. liczba ludności na świecie osiągnie około 9,9 mld. Fundamentalnym wyzwaniem w XXI wieku jest więc zapewnienie rozwoju cywilizacji przy rosnącym zapotrzebowaniu ludzkości na żywność, surowce przemysłowe i energetyczne, a także zabezpieczenie dostępu do złóż kopalin metalicznych, skalnych i chemicznych, zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju.

Diagnoza stanu gospodarki surowcowej i potrzeb krajów UE w zakresie zabezpieczenia dostępu do deficytowych złóż metali strategicznych wskazuje, że zrównoważony rozwój tego regionu zależeć będzie od efektywności zastosowań innowacyjnych technologii, ujawnienia nowych złóż, oszczędnego gospodarowania surowcami wtórnymi i odpadami.

Zagospodarowanie zasobów kopalin oceanicznych systematycznie rozszerza się. Znaczenia zasobów surowców metalicznych, dla zapewnienia zrównoważonego rozwoju ludzkości w obecnym stuleciu nie sposób przecenić. Racjonalna gospodarka zasobami kopalin oceanicznych, w okresie zrównoważonego rozwoju, powinna uwzględniać kryteria ekonomiczne i obecny stan środowiska morskiego [1, 5, 6, 8, 10, 18, 22, 24, 31].

Zainteresowania oceanotechników koncentrują się obecnie wokół zagadnień górnictwa morskiego. Działania te zmierzają do projektowania i wykonywania systemów morskich w celu podjęcia efektywnej eksploatacji złóż kopalin oceanicznych, w zróżnicowanych warunkach ich występowania i rozmieszczenia. W ostatnim dwudziestolecu zakres informacji

* Wydział Techniki Morskiej i Transportu, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie; Wspólna Organizacja Interoceanmetal (IOM), Szczecin

** Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Szczeciński; Wspólna Organizacja Interoceanmetal (IOM), Szczecin

o oceanach istotnie rozszerzał się, stwarzając podstawy do podjęcia eksploatacji różnorodnych surowców, z zachowaniem warunków środowiska oceanicznego [7, 9, 12, 13, 15, 19, 23, 26, 27, 30, 33, 38].

2. Potencjał zasobowy surowców metalicznych

W okresie ostatniego dziesięciolecia rynki towarowe, w tym metali i minerałów odznaczają się zwiększoną niestabilnością i zmianami cen. Wynika to ze zmian w globalnej strukturze podaży i zwiększonego popytu na surowce metaliczne, m.in. w Chinach, Indiach i Brazylii. Według Światowego Biura Statystyki Metali (WMSB), 2009, tylko w tym dziesięcioleciu w Chinach, które są największym konsumentem metali na świecie zużycie miedzi wzrosło z 12 do 40%. W sytuacji, gdy zagospodarowanie rozpoznanych i udokumentowanych zasobów złóż, ze zmiennym tempem wzrasta, a obecnie wiele krajów już wyczerpało możliwości pozyskiwania surowców metalicznych, stan ten wymaga efektywnego i zrównoważonego zabezpieczenia dostępu do surowców metalicznych, w tym dla krajów Unii Europejskiej. Stąd też podejmowane są działania zmierzające do racjonalnego wykorzystywania oceanicznych złóż kopalin mineralnych, w tym metalicznych [1, 6, 7, 10, 22, 24].

Zależność gospodarki UE od importu i dostaw surowców mineralnych stwarza w perspektywie XXI wieku, wobec wzrastającej konkurencyjności i globalizacji, ograniczenia rozwoju firm i możliwości efektywnej realizacji celów strategii Lizbońskiej, w zakresie wzrostu gospodarczego i zatrudnienia. Wynika stąd konieczność zwiększenia bezpieczeństwa dostaw, zabezpieczenia i racjonalnego wykorzystania zasobów, recyklingu oraz efektywnej eksploatacji złóż metali strategicznych i zużycia w różnych gałęziach przemysłu. Z raportu Komisji Güntera Verheugena wynika, że kraje UE importują większość metali strategicznych, w tym niklu, kobaltu, metali ziem rzadkich i platynowce. Stan ten ogranicza rozwój technologiczny oraz możliwości produkcji napędów hybrydowych, elektroniki i łączności, sensorów. Wobec tych wyzwań szczególnie znaczenia nabierają podejmowane zintegrowane programy zmierzające do zapewnienia niezawodnego i niezależnego dostępu do zasobów metali strategicznych, w ramach tzw. Inicjatywy Surowcowej (*Raw Material Initiative*), programu innowacyjnego (*Strategic Research Agenda*), czy też realizowane zintegrowane programy badawcze, pod auspicjami ISA, zmierzające do poszukiwania i racjonalnego wykorzystywania zasobów kopalin polimetalicznych, w obszarze międzynarodowym „morza otwartego”, zgodnie z Konwencją UNCLOS.

Należy podkreślić, że intensywność wykorzystania surowców metalicznych wykazuje sukcesywny wzrost. Szacuje się, że wykorzystanie metali wynosi: od 0,4 do 0,7 rud Pb, Sn, Ag i Au, od 0,2 do 0,4 rud Cu, Ni, Zn oraz poniżej 0,2 Mn, Cr i Co [30, 31]. Należy zaznaczyć, że najwyższe zużycie powyżej 0,5 rejestruje się dla złóż metali: Pb, Sn, Sb, Ag i Au, od 0,5 do 0,3 dla Zn, Cu, Ni, zaś od 0,3 do 0,1 dla rud Fe, Mn, Cr i Co oraz poniżej 0,1 dla boksytów. Wynika stąd, że najwyższym wskaźnikiem zabezpieczenia odznaczają się surowce dwóch ostatnich grup. Wskaźniki wzrostu zapotrzebowania na metale wskazują na

wielokrotny wzrost w przypadku Zn (3,81), Co (3,42), Ni (2,19), Cu (1,86), Sb (1,72), Sn (1,45), Pb (1,32) oraz Mn (1,14), Au (1,15) i poniżej 1 dla Cr i Ag [30].

O wzrastającej roli w gospodarce światowej niektórych metali świadczy również ich wyższy udział w eksporcie, który obecnie w przypadku rud Fe osiągnął ponad 40%, rud Cu — 32%, rud Zn — 31%, ołowiu — 18% a cyny — aż 80%. Obecnie najwyższe zużycie notuje się w przypadku rud Fe — ponad 500 mln t rocznie, boksyty — ponad 20 mln t, Cu — ponad 10 mln t, Mn i Zn — po około 7 mln t oraz Cr — ponad 3 mln t. Wysokim stopniem wyeksploatowania odznaczają się między innymi: złoża Fe i Cr, boksyty, Cu, Ni, Zn, Au. Niezależnie od wiarygodności prognozy i okresu ich wyeksploatowania staje się oczywiste, że niektóre ważne surowce metaliczne będą znacznie trudniej dostępne po 2020 r.

Grupa oceanicznych złóż kopalin polimetalicznych stanowi alternatywną możliwość pozyskiwania deficytowych już obecnie metali strategicznych i pierwiastków ziem rzadkich (REE). Szczególną wartość przemysłową, ze względu na wysoki stopień koncentracji, mają w złożach kopalin siarczkowych i tlenkowych żelazowo manganowych takie metale jak: Ni, Cu, Co, Ag, Au, Mn, Mo, Zn i Pt i REE. Koncentracje metali w złożach oceanicznych do ich zawartości w złożach lądowych, a w szczególności Ni, Co, Cu i Ag są zbliżone (tab. 1) [5, 6, 10, 18, 24].

TABELA 1

Średnie zawartości metali w wydobywanych rudach złóż lądowych oraz w koncentracjach polimetalicznych i naskorupieniach kobaltonośnych (w%) [9, 10, 24]

Metal	W rudach na lądzie			Obszar koncentracjonalny CCZ	Średnie zawartości w naskorupieniach Pacyfiku
	1990	2000	2010		
Nikiel	1,8	1,5	1,2	1,1–1,4	0,51
Miedź	1,6	1,5	1,2	0,95–1,3	0,08
Kobalt	0,22	0,20	0,15	0,18–0,21	0,87
Mangan	37,0	36,5	35,0	28,5–32,0	23,0

Głównym czynnikiem wpływającym na ekonomiczną wartość oceanicznych surowców jest wyższa zawartość metali w porównaniu do ich zawartości w obecnie eksploatowanych złożach na lądzie oraz ich zasoby prognostyczne [6, 10, 32].

Należy podkreślić, że średnie zawartości metali w tlenkowych kopalinach manganowych są wyższe od występujących w złożach wydobywanych na lądzie odpowiednio dla: Ni — 1,1; Cu — 1,14; Mn — 1,3 a Co wg szacunków nawet więcej niż 5 razy [10, 23, 24].

Równocześnie z głównymi metalami praktyczne znaczenie mają w oceanicznych kopalinach polimetalicznych: Mn, Co, Ni, Cu, Mo, Au, Ag, Zn, PGE — platynowce, REE — ziem rzadkich (Ce, Nd, Y, La), Ti, W, Zr, Bi [6, 10, 26, 31].

3. Oceaniczne złoża kopalin polimetalicznych, ich rozmieszczenie i warunki występowania

Wieloletnie kompleksowe badania oceanicznych tlenkowych skupień Fe-Mn i masywnych siarczków zmierzające do ujawnienia najbardziej perspektywicznych nagromadzeń złożowych wykazały regionalne zróżnicowanie zasobów kopalin metalicznych. Rozpoznane obszary złożowe występują w głębokowodnych basenach oceanicznych, na grzbietach śród-oceanicznych, wulkanicznych górach podmorskich i odznaczają się podwyższonymi koncentracjami metali strategicznych [21, 23, 25, 27, 38].

3.1. Oceaniczne tlenkowe skupienia Fe-Mn

Polimineralne skupienia uwodnionych tlenków manganu i żelaza zawierają w swoim składzie ponad 20 metali o wysokiej koncentracji. W skupieniach tych oprócz grupy metali głównych (metale grupy żelaza) występują metale nieżelazne i rzadkie. W grupie metali żelaza ważne znaczenie praktyczne mają Mn, Ni, Co, Mo, a z pozostałych Cu, REE, Ti i metale szlachetne [12, 18, 23, 26].

Oceaniczne tlenkowe nagromadzenia manganu odznaczają się znacznie wyższymi parametrami technologicznymi od rud eksploatowanych w wielu złożach na lądzie, a pod względem wartości ekonomicznej porównywalne są z najbogatszymi siarczkowymi rudami Cu-Ni, np. typu Norylsk. Poza tym, konkretne polimetaliczne są cenne nie tylko jako ruda ze względu na wysoką zawartość metali, ale stanowią one wartościowy materiał, który może mieć zastosowanie jako wydajny sorbent do oczyszczania gazów czy surowiec do syntezy nieorganicznych materiałów jonowymiennych. Produkty przeróbki konkretnej zastępują bardzo drogie smoły syntetyczne do dezaktywacji wód, specjalne materiały stosowane do oczyszczania ścieków przemysłowych w metalurgii oraz odzyskiwania metali. Z kolei naskorupienia kobaltonośne mogą być ważnym wskaźnikiem zmian oceanicznych i klimatycznych w okresie ostatnich 60 mln lat [15, 16].

Wyniki badań nagromadzeń złożowych Fe-Mn, ujawnione w perspektywicznych rejonach oceanów Ziemi wskazują, że około 80% oszacowanych zasobów perspektywicznych przypada na Pacyfik, a znacząco mniej na Ocean Atlantycki i Indyjski. Wyniki badań rozpoznawczych wskazują na bezpośrednie genetyczne zależności formowania wzbogaconych w metale tlenkowych skupień Fe-Mn od geodynamicznej mobilizacji składników, w tym metali, doprowadzonych do wód oceanicznych (tab. 2).

Konkrety pokrywają olbrzymie powierzchnie dna oceanów i występują na głębokościach rzędu 3500–6000 m. Spośród rozpoznanych pól złożowych o potencjalnym znaczeniu przemysłowym unikalną pozycję zajmuje pole konkretonośne Clarion–Clipperton na Pacyfiku oraz pole w basenie Centralno-Indyjskim [21, 23, 27].

Z kolei obecność perspektywicznych nagromadzeń naskorupień kobaltonośnych, zawierających koncentracje Mn, Co i Pt ujawniono w strefach wyniesień i gór podwodnych — gujotów Pacyfiku w północnej części łańcucha Lain, Wysp Marshalla, archipelagu Tuamoto, w obszarze Wake-Necker [1, 11, 15, 16].

TABELA 2

Koncentracje metali w tlenkowych skupieniach Fe-Mn – konkretne polimetaliczne i naskorupienia kobaltonośne [23, 26, 27]

Perspektywiczne obszary złóżowe	Metale										
	Mn	Fe	Ni	Cu	Co	Pt	Y	La	Ce	Nd	Pd
	[%wag.]					[p.p.m.]					
Pacyfik	21,08	11,0	0,80	0,59	0,27	–	344,3	147,8	293,5	151,0	7,2
Clarion-Clipperton Ni-Co, Ni-Cu-Co	27,2	6,3	1,22	1,02	0,21	0,10	246	227,3	392,7	217,3	–
Wake 2Co/naskorupienia	19,2	14,5	0,53	0,28	0,42	–	352	281	1531	–	–
Ocean Indyjski	16,36	14,25	0,39	0,17	0,20	–	62,3	163,3	885,9	3,5	8,7
Centralno-Indyjskie Ni-Cu	22,7	9,0	0,93	0,80	0,14	–	–	–	–	–	–

3.2. Konkrecje polimetaliczne pola Clarion–Clipperton

Pole Clarion–Clipperton zajmuje wśród ujawnionych pól wyjątkową pozycję i odznacza się, w porównaniu do innych pól, wysokim wskaźnikiem konkrecyjności powyżej 10 kg/m^2 , przy równocześnie najwyższej koncentracji metali. Konkrecje zalegają w tym polu na głębokościach od 3800–5200 m, a średnie zawartości głównych metali wahają się: dla manganu od 28–32%, niklu — 1,1–1,4%, miedzi — 0,95–1,3% i kobaltu — 0,21%.

Ujawniona prawidłowość rozmieszczenia konkrecji związana jest z interwałem krytycznej głębokości kompensacji węglanu wapnia (CCD) około 4400 m p.p.m. Na poziomym głębokościowym CCD (*Calcium Compensation Depths*) w interwale głębokości około 4200 m dominują małe ($< 4 \text{ cm}$) konkrecje sferoidalne, o gładkiej powierzchni typu hydrogenicznego „H” o podwyższonej zawartości Fe (10,32%) i Co (0,23%) oraz relatywnie niższej zawartości Mn, Ni i Cu. W interwale głębokości 4200–4400 m p.p.m. występuje przejściowy typ konkrecji „HD” oznaczający się podwyższoną zawartością Mn — $> 30,5\%$ oraz Ni i Cu przy niższej zawartości Co $< 0,18\%$. Natomiast z reguły poniżej interwału głębokości CCD od 4500 m p.p.m. występują konkrecje dyskoidalne i elipsoidalne, typu diagenetycznego „D”, większe (o rozmiarach 6–12 cm) i silnie urzeźbionej powierzchni. Z obserwowanym obniżeniem dna w kierunku z N na S, od strefy rozłamowej Clarion do Clipperton, zmniejsza się udział konkrecji „H” i „HD” — typu przejściowego, o rozmiarach modalnych $< 6 \text{ cm}$, zaś stopniowo zwiększa się udział konkrecji „D”, o rozmiarach modalnych $> 6 \text{ cm}$. Koncentracja metali w konkrecjach jest wyrazem zmienności składu mineralnego. W konkrecjach typu „H” dominują amorficzne fazy mineralne $\delta \text{ MnO}_2$ – wernadyt. Natomiast w konkrecjach typu „D” fazy krystaliczne todorokit (10Å) i birnessite (7Å) [25].

Zasoby prognostyczne konkrecji polimetalicznych w polu Clarion–Clipperton szacowane są wg najnowszych danych na około 34 mld t, w tym zasoby: Mn — 7.500 mln t; Ni — 340 mln t; Cu — 265 mln t, zaś Co — 78 mln t [33].

Na obszarze IOM konkrecje są pogrążone w uwodnionej warstwie osadów (do 4–12 cm) i częściowo przysypane osadami współczesnymi. Obecność przysypanych konkrecji stwierdzono na około 70% stacji. Stopień przysypania konkrecji osadami wzrasta z głębokością w kierunku z N na S.

Najwyższą gęstość pokrycia dna konkrecjami rejestruje się w interwale głębokości 4200–4500 m p.p.m. Ze wzrostem głębokości z N na S (15–9°N) rejestruje się pewna prawidłowość wzrostu zawartości Mn, Cu w konkrecjach, przy zmniejszającym się udziale Ni i Co. Podwyższonymi zawartościami Co odznaczają się konkrecje (typu „H” i „D”) występujące w północnej części regionu wschodniego. Wzrost zawartości Mn, Cu i Ni rejestruje się w konkrecjach centralnej części tego obszaru (typ „D”), zaś na południu wyraźnie wzrasta w konkrecjach udział Mn (typ „D”) [25, 29].

Obszar wydobywczy IOM odznacza się zasobami umożliwiającymi przemysłowe wydobycie przez okres 20–25 lat na poziomie $1,5\text{--}4 \times 10^6$ ton konkrecji *in situ* (mokrych) rocznie przy zawartościach metali w konkrecjach od 1,25–1,50% Ni, 1,0–1,4% Cu, 27–30% Mn i 0,15–0,25% Co (tab.3).

TABELA 3
Koncentracje metali w konkretnych polimetalicznych (dane IOM)

Perspektywny obszar złóż	Metale													
	Mn	Fe	Ni	Cu	Co	Pt	Au	Ag	Y	La	Ce	Nd	Sm	Mo
	[%wag]						[p.p.m.]							
Obszar IOM	31,6	5,42	1,32	1,23	0,18	0,01-0,05	+	+	68,7	71,7	162,0	85,6	20,0	56,84

Zasoby konkrecji zalegających na powierzchni dna obszaru wydobywczego IOM (B₂) oszacowane są przyjmując średni wskaźnik gęstości pokrycia dna konkrecjami 9,8 kg/m², przy zawartościach Mn — 31,36% i sumy (Cu+Ni+Co) — 2,73%. Szacunkowe zasoby konkrecji mokrych, na „działce” IOM o powierzchni 75 000 km² zabezpieczają maksymalny poziom wydobywania przez 20–25 lat.

Rozmieszczenie konkrecji na powierzchni dna obszaru IOM i wskaźnik gęstości pokrycia dna są skrajnie zróżnicowane. Kontury, rozmiary i forma izolowanych produktywnych stref złożowych determinowane są przez relief dna. Granice nagromadzeń „pasmowych” (*streaked*), o szerokościach 2 do 10 km i długości do kilkudziesięciu kilometrów, wyznaczone są przez kontury wyniesień i obniżen, zwykle o stromo nachylonych zboczach [28]. Natomiast nagromadzenia „płatowe”, o szerokościach około 70 km i długości do 120 km, występują na wyrównanych powierzchniach dna. Wyróżnione rodzaje nagromadzeń wykazują dużą zmienność zarówno pod względem rozmiarów, jak też rozmieszczenia konkrecji w ich obrębie.

3.3. Naskorupienia kobaltonośne

Analiza opublikowanych danych regionalnych wskazuje, że najwyższą częstotliwością występowania naskorupień Fe-Mn, wyróżniają się góry podmorskie i wulkaniczno-tektoniczne wyniesienia w północno-zachodniej części Pacyfiku, południowej części Atlantyku i Oceanu Indyjskiego [1, 11, 15–17, 23]. Naskorupienia Co związane są ze strefami aktywności wulkanicznej od wczesnej kredy do miocenu. Naskorupienia kobaltonośne z reguły formowane są na obszarach o silnie urozmaiconym reliefie odznaczającym się amplitudą zmian głębokości ponad 1000 m oraz przewyższeniami pojedynczych gór w obrębie basenów abysalnych [23].

Wyróżniającą cechą wyniesień podwodnych i gujotów jest ich wulkaniczny fundament, często pod pokrywą skał wapiennych. Z reguły wyrównane powierzchnie szczytowe pokryte są piaskami foraminiferowymi i otoczone barierą wapieni koralowych. Skłony gór i gujotów charakteryzują się nachyleniem zboczy do 15–20° i często obecnością wychodni bazaltów. Na zboczach występują nagromadzenia produktów wietrzenia bazaltów, tj. brekcji, grawelitów czy piasków [1, 15, 16, 23].

Średni poziom batymetryczny powierzchni szczytowej gujotów położony jest na głębokościach około 1500 m p.p.m. z podstawą równi abysalnej około 5000–5700 m p.p.m., położoną na fundamencie reprezentowanym przez bazyalty toleitowe lub subzasadowe (oliwinowe), o wieku od kredy do miocenu.

Analiza przestrzennego rozmieszczenia naskorupień Fe-Mn na gujotach północno-zachodniego Pacyfiku i Atlantyku jednoznacznie wskazuje na wielofazowe procesy ich formowania. Najbardziej produktywny poziom ich występowania, występuje w interwale głębokości 500–2500 m p.p.m., średnio około 1100 m p.p.m. Konkrecje i naskorupienia współwystępują z brekcjami, które zwykle pokryte są nalotami Fe-Mn. Miąższość naskorupień waha się od 1 do 20 cm, przy zmiennej zawartości Co od 0,4 do 1,98% [1, 16, 17]. Po-

wierzchnia i konfiguracja skupień złożowych ściśle związana jest z formą, tj. morfometrią gujota, interwałem głębokościowym i charakterem urzeźbienia jego powierzchni. Sprzyjające formowaniu naskorupień są wyrównane, lekko faliste powierzchnie szczytów i terasy gujotów, pozbawione sedimentacji. Naskorupienia kobaltonośne Atlantyku w rejonach wulkaniczno-tektonicznych wyniesień (Góry Nowej Anglii czy Sierra Leone) bezpośrednio związane są z wygasłą aktywnością wulkaniczną, w okresie ostatnich 10-15 mln lat temu. Na aktywnych stożkach wulkanów nie stwierdzono naskorupień, poza naskorupieniami hydrotermalnymi odznaczającymi się niskimi zawartościami Co < 0,1%.

Naskorupienia formowane są warstwowo na skałach fundamentu bazaltowego, grawelitach i brekcjach lub zliityfikowanych osadach, tworząc równoległe ciągłe makrolaminy. Ich miąższość waha się od 0,1–0,2 do 15–20 cm i bezpośrednio związana jest z położeniem w reliefie oraz określonym interwałem głębokości. Maksymalne miąższości rejestruje się pomiędzy 800–1200 m, zaś minimalne pomiędzy 1200–2500 m z lokalnymi wahaniami. Poniżej 2500 m rejestruje się wyraźne zmniejszenie ich miąższości, z wyjątkiem lokalnych odrębności. Granice kontaktu naskorupień z substratem są wyraźne — ostre. Wyróżniającą cechą naskorupień są wysokie zawartości Co (0,5–1,0%) i Mn (25–30%), przy niskiej zawartości Ni (do 0,6%), a szczególnie Cu (do 0,2%) [1, 16, 17].

Biorąc pod uwagę wysoką koncentrację kobaltu w naskorupieniach, wyróżnia się dwa główne rodzaje naskorupień: wielowarstwowe (powyżej 6 cm miąższości) i niższej koncentracji Co 0,5–0,8% (pacyficzne góry podmorskie Wake, Ogasawara, Magellan) oraz jednowarstwowe (do 6 cm miąższości) i wysokiej koncentracji Co \geq 0,8% — Necker, łuki wulkaniczne Lain i Hawajski [1, 16, 17].

Rytmiczno-warstwowa budowa naskorupień jest swoistą wyróżniającą cechą i odnosi się do wszystkich rozpoznanych wystąpień. Perspektywiczne znaczenie mają pokrywy Fe-Mn o miąższościach 3–6 cm, w których rejestruje się najwyższe zawartości kobaltu i innych metali w górnej warstewce do 5–8 mm.

Głównym minerałem naskorupień, które odznaczają się wzbogaceniem w Co, Mn i Ni, jest wernadyt. Przy wyższym udziale minerałów Fe rejestruje się podwyższoną zawartość Ti i Mo oraz REE i PGE. Udział minerałów podrzędnych jest niewielki, a ich spektrum szerokie. Szczegółowa analiza zmian składu mineralnego i zawartości metali w naskorupieniach przedstawiona jest w pracach [1, 11, 16, 17].

Uwzględniając ogólne zależności formowania różnych generacji naskorupień, za pierwszoplanowe do przeprowadzenia prospekcji należy uznać strefy Gór Magellana (Pacyfik), ujawnione i rozpoznane obszary złożowe: Fedorov (MŻ-35), Alba (MA-15), Gramberg (MŻ-36), Gelendzik (MŻ-37), Butakov (MŻ-39) i Govorov (MA-08), których zasoby prognostyczne szacowane są na około 80 MA ton suchej rudy na każdym z nich, a łączne zasoby prognostyczne szacowane są na około 300–400 mln ton. Zaden z perspektywicznych obiektów obszarów złożowych Atlantyku (Rio Grande, Walvis Ridge) nie jest porównywalny. Na obiektach tych interwał głębokości występowania naskorupień Co waha się od 1500–3500 m, przy zawartościach Mn (15–22%), Co (0,55–0,60%), Ni (0,45–0,5%) przy niewielkich zawartościach Mo, Pt i REE [1, 23, 45].

3.4. Hydrotermalne masywne siarczki

Obszary występowania masywnych polimetalicznych rud siarczkowych związane są z osiami rozrostu grzbietów śródoceanicznych i łuków wulkanicznych mórz marginalnych. Grzbiety odznaczające się obecnością asymetrycznych, ograniczonych uskoki dolin ryftowych, wyróżniają się intensywnym przebiegiem procesów hydrotermalnych i wulkaniczno-ekshalacyjnych skoncentrowanych zarówno w osi, jak i na zboczach dolin. Skupienia masywnych siarczków formowane są w wyniku współdziałania wód oceanicznych z wysoko temperaturowymi roztworami hydrotermalnymi i bazaltami oceanicznymi, w pobliżu aktywnych centrów magmatycznych. W warunkach dużej aktywności tektonicznej, uskoki i szczeliny umożliwiają infiltrację wód oceanicznych, które ogrzane tworzą mieszaninę z parą juwenilną i powodują selektywne wymywanie z magmy bazaltowej różnych pierwiastków. Wyróżniającą cechą stref aktywności hydrotermalnej są pasy wulkano-tektoniczne, odznaczające się podwyższonym strumieniem ciepłym [2, 3, 14, 19, 20, 23, 38]. Występowanie masywnych siarczków jest regionalnie zróżnicowane. Największą ilość potencjalnych obszarów złożowych ujawniono na Pacyfiku (388), Oceanie Atlantyckim (71), Oceanie Indyjskim (52), w Morzu Śródziemnym (16) i Oceanie Arktycznym (10).

Najbardziej perspektywicznymi obszarami poszukiwań masywnych rud siarczkowych są baseny węzłowe (*nodal basin*), tworzące często złącza potrójne (*triple junctions*) na przecięciu uskoki transformujących z ryftem. Odnaczają się one obecnością struktur nieciągłych, o charakterze ekstensywnym, oraz szczelin i uskokiów zrzutowo-przesuwczych [23, 38].

Nagromadzenia siarczków, występujące w osiach rozrostu Grzbietu Śródatlantyckiego i Wypiętrzenia Wschodniopacyficznego odznaczają się skrajnie zróżnicowaną zmiennością i wysokimi zawartościami metali, w rozpoznanych perspektywicznych obszarach złożowych (tab. 4).

TABELA 4

Szacunkowe zasoby metali w wybranych obszarach złożowych polimetalicznych siarczków [23]

Obszary, pola	Szacunkowe zasoby kopalni, [10 ⁶ t]	Zasoby metali				
		[10 ³ t]			[t]	
		Cu	Zn	Pb	Ag	Au
Ocean Atlantycki						
TAG	14,5	1141,2	488,7	–	1029,0	33,5
Snake Pit	2,4	430,0	96,0	–	108,0	24,0
Pacyfik						
Explorer	3,0	153,3	272,2	–	6120,0	6,42
Juan de Fuca	4,8	32,8	190,2	–	208,7	0,59
EPR (13°N)	5,8	166,0	504,2	0,7	466,5	0,5
Galapagos	10,0	380,0	88,0	–	280,0	1,1

Charakterystyczną cechą tych nagromadzeń są zmienne zawartości cynku i miedzi oraz srebra i złota. Jednym z najlepiej obecnie rozpoznanych obszarów złożowych jest Solvara w Morzu Bismarcka (Pacyfik) występujące na głębokości około 1600 m p.p.m. w Wyłącznej Strefie Ekonomicznej Papua-Nowej Gwiney/Nautilus Minerals Inc. — [34] (tab. 5).

TABELA 5

Zawartości metali w polimetalicznych siarczках w rejonie działek licencyjnych kampanii „Nautilus Minerals Inc.” [9, 19]

Działka	Ilość próbek	Au, [g/t]	Cu, [%wag.]	Zn, [%wag.]	Ag, [g/t]
Solvara-5	13	17,37	6,72	7,78	273
Solvara-6	4	18,10	14,24	18,66	217
Solvara-7	7	17,15	5,87	24,08	404
Solvara-8	12	16,90	6,10	32,50	328

Na Oceanie Atlantyckim najwyższe koncentracje hydrotermalnych skupień siarczoków występują pomiędzy transoceanicznymi strefami uskokowymi Pico i Fifteen-Twenty (Kurchatov — 40°27,8'N; Lucky Strike — 36°34,0'N; Oceanographer — 34°27,5'N; Broken Spur — 29°41,0'; TAG — 26°8,3'N; Snake Pit — 23°22,5'N i Logatchev — 12°54,6'N). W obrębie tej strefy tempo rozprzestniania dna (spreadingu) jest powolne < 3 cm/rok, a występujące nagromadzenia siarczoków tworzą formy kopulaste, o wysokościach do 70 m, przy średnicy podstawy nawet do kilkuset metrów [2]. Przejawy mineralizacji ujawniają się także w segmencie, ograniczonym od południa strefą uskokową Romanche oraz w strefie rozłamowej Ascension.

4. Uwarunkowania prawno-międzynarodowe zagospodarowania złóż kopalin metalicznych

Występujące w obrębie Wyłącznych Stref Ekonomicznych (EEZ) i szelfu kontynentalnego złoża ropy naftowej i gazu ziemnego, minerałów ciężkich oraz surowców budowlanych i chemicznych są przedmiotem intensywnych poszukiwań, a ich znaczenie systematycznie wzrasta. Natomiast obszary występowania złóż kopalin polimetalicznych stanowią obecnie obiekt intensywnej eksploracji w obszarach tzw. „morza otwartego” [23, 24, 27].

Obszary występowania głębokowodnych kopalin polimetalicznych, pod względem statusu prawnego, opartego na gruncie doktryny prawa międzynarodowego i w świetle regulacji Konwencji Prawa Morza ONZ, należą do obszarów morskich, poza granicami jurysdykcji państwowej („morze otwarte”), na których w odniesieniu do zasobów mineralnych na dnie i pod dnem morskim jest urzeczywistniana zasada „wspólnego dziedzictwa ludzkości” [22, 24].

Działalność geologiczno-poszukiwawcza, zmierzająca do rozpoznania i zagospodarowania oceanicznych złóż kopalin polimetalicznych występujących w strefie „morza otwartego”, zabezpieczona jest odpowiednimi regulacjami prawno-międzynarodowymi. Administrowanie i zarządzanie zasobami tzw. „Obszaru” pozostaje w gestii ISA, która jest podmiotem prawa międzynarodowego. Według aktualnego stanu uczestnikami Konwencji Prawa Morza ONZ (UNCLOS) jest 161 państw i Unia Europejska (dokumenty ISA, 2011). Zgodnie z Rezolucją II tej Konwencji wyłącznym prawem do prowadzenia badań na wydzielonych i zarejestrowanych obszarach dna oceanicznego dysponują tzw. kontraktorzy, zarejestrowani jako „inwestorzy pionierscy”. Status kontraktora gwarantuje wyłączne prawo do prowadzenia eksploracji i uzyskania licencji wydobywczej na przemysłowe zagospodarowanie złóż kopalin polimetalicznych. W odniesieniu do złóż konkrekcji polimetalicznych status taki posiadają obecnie Francja, Rosja, Japonia, Indie, Chiny, Korea Płd., Interoceanmetal (IOM), Niemcy, Nauru i Tonga. Natomiast dla polimetalicznych złóż minerałów siarczkowych i naskorupień kobaltońskich ustalone zostały warunki prowadzenia poszukiwań, co umożliwiło rozpoczęcie procesu rejestracji perspektywicznych obszarów wydobywczych i ich eksplorację (Chiny, Federacja Rosyjska) — [dane ISA].

Wyróżniającą cechą obecnego etapu eksploracji kopalin polimetalicznych jest powszechne stosowanie nowych — zunifikowanych metod, technik i technologii badań poszukiwawczo-dokumentacyjnych odznaczających się kompleksowością i wysoką efektywnością prac, które są wykonywane w ramach zintegrowanych programów badawczych, prowadzonych pod zarządem i nadzorem Międzynarodowej Organizacji Dna Morskiego ONZ (*International Seabed Authority* – ISA) [8, 24].

Wspólna Organizacja Interoceanmetal (IOM) jest podmiotem prawa międzynarodowego, która występuje jako międzynarodowa organizacja badawcza o charakterze rządowym. Zgodnie z Art. 14 „Międzyrządowego Porozumienia o Utworzeniu Wspólnej Organizacji Interoceanmetal” Interoceanmetal prowadzi prace w zakresie poszukiwania, rozpoznawania i przygotowania do przemysłowego zagospodarowania konkrekcji żelazowo-manganowych, na Pacyfiku.

IOM realizuje swoje zadania zgodnie z ustaleniami III Konferencji Prawa Morza ONZ. Konwencja Prawa Morza ONZ (UNCLOS), którą ratyfikowało 159 państw i Unia Europejska, weszła w życie 16 listopada 1994 r. i została ratyfikowana przez Prezydenta RP 13 listopada 1998 r. Zgodnie z Konwencją IOM uzyskał status „inwestora pionierskiego” 22 sierpnia 1991 r. Prawa i obowiązki IOM wynikające z prawa międzynarodowego są konsekwencją przyznania tej organizacji statusu inwestora pionierskiego (*pioneer investors*), zgodnie z postanowieniami konwencji UNCLOS 1982 i Rezolucji II.

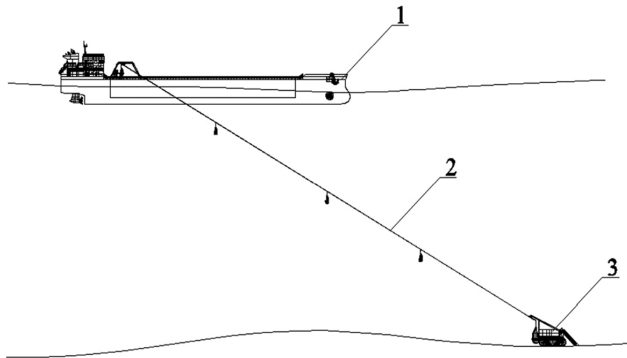
Prace i badania prowadzone są przez IOM na podstawie kontraktu zawartego z ISA 29 marca 2001 r., na zarejestrowanym obszarze badawczym o powierzchni 75 000 km² (B₂+B₁) położonym we wschodniej części strefy Clarion–Clipperton na Pacyfiku, pod zarządem i administracją International Seabed Authority (ISA), która jest organizacją międzynarodową, w strukturze Organizacji Narodów Zjednoczonych.

5. Technologie wydobywania kopalin polimetalicznych

Metody stosowane w badaniach geologiczno-poszukiwawczych i dokumentacyjnych oraz wydobywaniu surowców ze złóż lądowych znacząco różnią się od technologii stosowanych w górnictwie morskim. Zróżnicowane warunki geologiczno-górnictwa występowania i rozmieszczenia złóż kopalin oceanicznych stawiają bardzo wysokie wymagania rozwiązań technologicznych dla morskich maszyn górniczych i systemów wydobywczych, co wynika ze skrajnie zmiennych warunków środowiska oceanicznego. Różnice te wynikają również z samej natury złóż, ich struktury przestrzennej, składu chemicznego i cech fizyko-mechanicznych kopaliny oraz dużej zmienności zawartości składników użytecznych. Obecnie rozróżnia się trzy podstawowe rodzaje złóż będących przedmiotem zainteresowania górnictwa morskiego: masywne polimetaliczne siarczki, naskorupienia kobaltonośne oraz konkracje polimetaliczne. Jakkolwiek niektóre parametry geologiczno-górnictwa są zbliżone, to złoża występujące w ujawnionych obszarach wyróżniają się odmiennością determinującą różnice w technologii ich wydobywania [2, 4, 14, 17, 20, 34, 35, 37, 39, 40–44, 46].

Wspólnymi elementami kompleksu wydobywczego dla wymienionych złóż będą następujące systemy:

- system zbierający kopalinę z dna,
- system transportujący urobek w pionie do powierzchni oceanu,
- system terminalowo-magazynowy na powierzchni wody,
- system transportowy wykonujący operację transportu do zakładu przeróbki.



Rys. 1. Podstawowe systemy kompleksu wydobywczego [35]:

- 1 — system terminalowo-magazynowy na powierzchni; 2 — system transportu pionowego;
3 — system zbierający kopalinę

Trzy z wymienionych systemów zaprezentowano na rysunku 1, na przykładzie propozycji kompleksu wydobywania konkracji polimetalicznych [35] w którym system transportu pionowego realizowany jest przy pomocy metody linowej.

Projekt wstępny statku wydobywczego wraz z systemem transportu pionowego hydraulicznego opracowany został przez firmę Jan De Nul dla firmy wydobywczej Nautilus Minerals Inc. dla wydobycia siarczków polimetalicznych (rys. 2) [34].

Organizacja InterOceanmetal opracowała koncepcję kompleksu wydobywczego konkcrcji opartą również o system transportu pionowego (rys. 3) [40, 41]. Obliczenia przeprowadzono dla sześciu konfiguracji elementów składowych (agregatu zbierającego konkcrcje, bufora, pomp i rozdrabniacza). System jest czysto hydrauliczny — ruch pionowy mieszaniny rozdrobnionych konkcrcji i wody realizowany jest przy pomocy pomp bez dodatkowego wprowadzania w instalację sprężonego powietrza. Obecnie kontynuowane są badania dotyczące projektów technicznych bufora, agregatu zbierającego oraz symulacji dynamiki kompleksu wydobywczego w różnych wariantach projektowych. Wyniki umożliwią opracowanie metodyki dla optymalizacji wariantów projektowych kompleksu w taki sposób, aby parametry projektowe kompleksu wydobywczego mogły być wyznaczane dla założonych charakterystyk technicznych (np. roczne wydobycie) wynikających z aktualnej sytuacji ekonomicznej na rynku surowców.

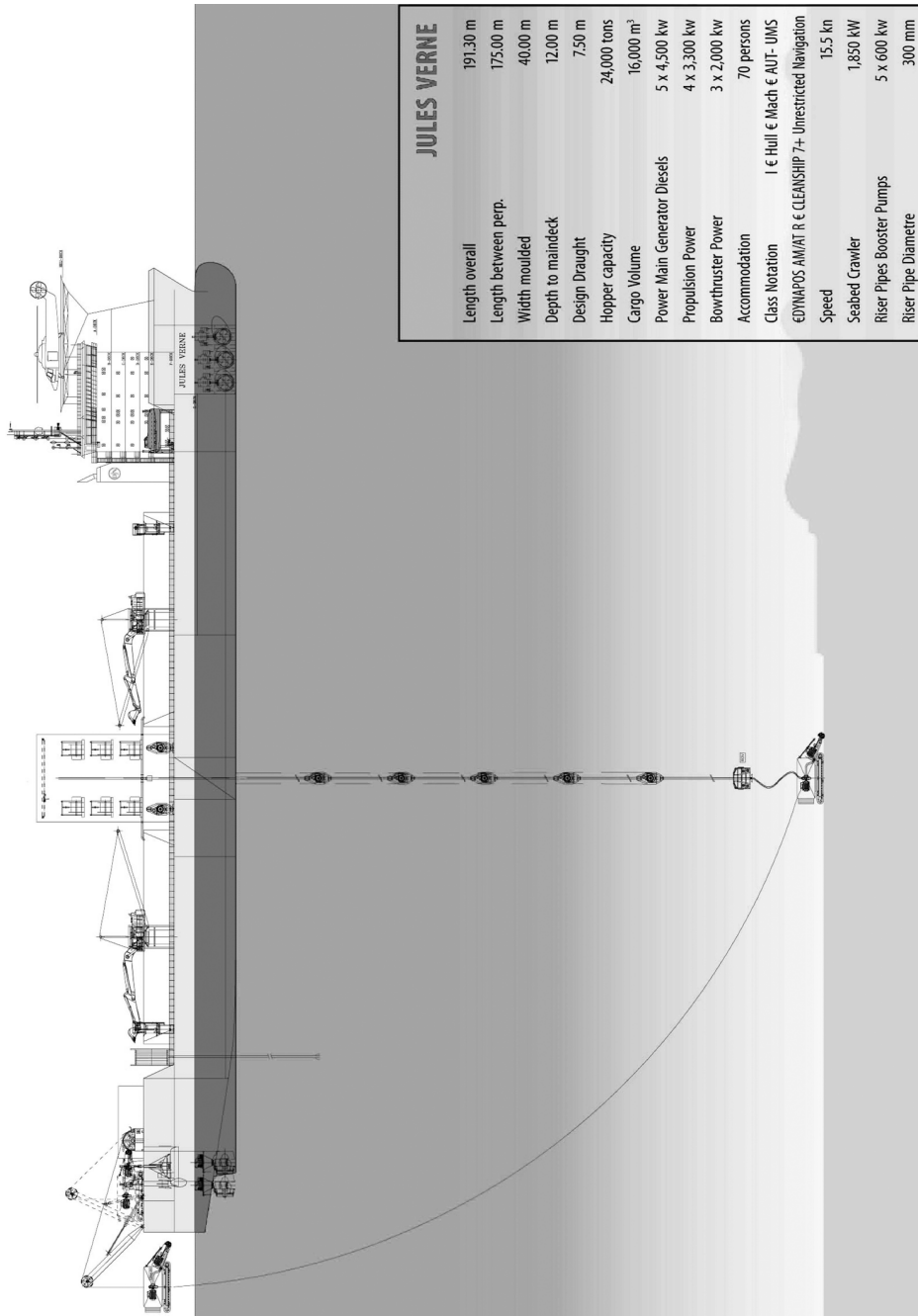
Należy podkreślić, że dla odmiennych rodzajów złóż, w odniesieniu do systemów wydobycia, istnieje bardzo wiele elementów wspólnych. Jakkolwiek wiedza zdobywana podczas rozwoju technologii dla jednego z rodzajów złóż może częściowo służyć przy projektowaniu innych, należy zdawać sobie sprawę z istniejących różnic. Podstawową różnicą są oceanograficzne charakterystyki potencjalnych obszarów złożowych, w tym inna w każdym przypadku głębokość eksploatacyjna złoża, z czym wiąże się np. ilość energii potrzebnej do wydobycie jednej tony kopaliny.

Najbardziej istotną różnicę stanowi jednak fakt zupełnie odmiennego sposobu zalegania naskorupień kobaltonośnych, siarczków polimetalicznych czy konkcrcji. Różnice w sposobie zalegania powodują, że podczas projektowania systemów dla poszczególnych typów złóż należy uwzględnić między innymi następujące parametry eksploatacyjne:

- Produktywne naskorupienia kobaltonośne posiadają miąższość rzędu kilkudziesięciu milimetrów (60–80).
- Polimetaliczne masywne siarczki zalegają w postaci twardych i grubych na 15–20 m masywnych pokryw.
- Konkcrcje zalegają na powierzchni osadów, o średniej gęstości pokrycia dna około 10 kg/m^2 (mokrych), tworząc struktury produktywne o zróżnicowanej przestrzennie formie i powierzchni.

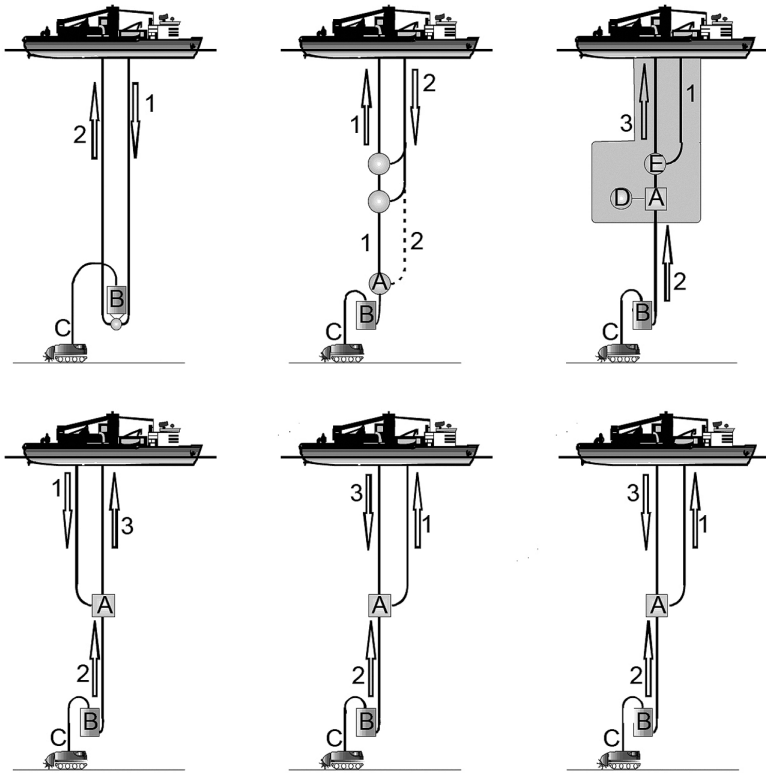
Z powyższego wynika że przy założeniu eksploatacji 2 milionów ton kopaliny powierzchni produktywnych stref wydobywczych będzie zróżnicowana [41–44, 46]:

- Naskorupienia kobaltonośne — roczna powierzchnia eksploatacji rzędu kilkunastu kilometrów kwadratowych (np. pole $\sim 3 \times 4 \text{ km}$).
- Siarczki polimetaliczne – roczna powierzchnia eksploatacji rzędu kwadratu o bokach kilkuset metrów (np. $\sim 0,09 \text{ km}^2$).
- Konkcrcje — roczna powierzchnia eksploatacji rzędu $2 \times 10^8 \text{ m}^2$ — kwadrat o boku około 14 km.



JULES VERNE	
Length overall	191.30 m
Length between perp.	175.00 m
Width moulded	40.00 m
Depth to maindeck	12.00 m
Design Draught	7.50 m
Hopper capacity	24,000 tons
Cargo Volume	16,000 m ³
Power Main Generator Diesels	5 x 4,500 kw
Propulsion Power	4 x 3,300 kw
Bowthruster Power	3 x 2,000 kw
Accommodation	70 persons
Class Notation	1 € Hull € Mach € AUT- UMS
	EDYMAPOS AM/AT R € CLEANSHIP 7+ Unrestricted Navigation
Speed	15.5 kn
Seabed Crawler	1,850 kw
Riser Pipes Booster Pumps	5 x 600 kw
Riser Pipe Diameter	300 mm

Rys. 2. Koncepcja statku wydobywczego Jules Verne, hydrauliczny system transportu pionowego [34]



Rys. 3. Koncepcja transportu pionowego opracowana przez IOM. Przetestowano sześć konfiguracji systemu [40]. Oznaczenia: A – rozdrabniacz, B – bufor, C – agregat zbierający, D – pompa zrzutowa, E – pompa podnosząca

System wydobywczy dla naskorupień i dla siarczków może być właściwie stacjonarny, natomiast kompleks dla wydobycia konkrecji jest systemem, który w trakcie ruchu po dnie agregatu powinien za nim stale podążać kompensując inercję systemu transportu pionowego. Kontrolowanie ruchu pionowej rury wydobywczej o długości 5 km nie jest zadaniem trywialnym, nawet jeżeli rura ta posiada zerową pływalność. Należy zaznaczyć, że nawet przy zerowej pływalności, parametry bezwładności rury wydobywczej są podobne jak w powietrzu.

Z kolei wymagania dla systemów zbierających (agregatów) dla siarczków i naskorupień są znacznie trudniejsze do spełnienia niż dla agregatu zbierającego konkrecje. Obecne systemy dla siarczków polimetalicznych obejmują aż trzy urządzenia denne pracujące w celu uzyskania kopaliny i przekazania jej do instalacji transportu pionowego. W przypadku eksploatacji siarczków pola Solwara 1, na Morzu Bismarcka, będzie to wrębiarka główna (o dużej wydajności – rys. 4), wrębiarka pomocnicza (mniejsza wydajność, większa mobilność) i agregat zbierający [34].

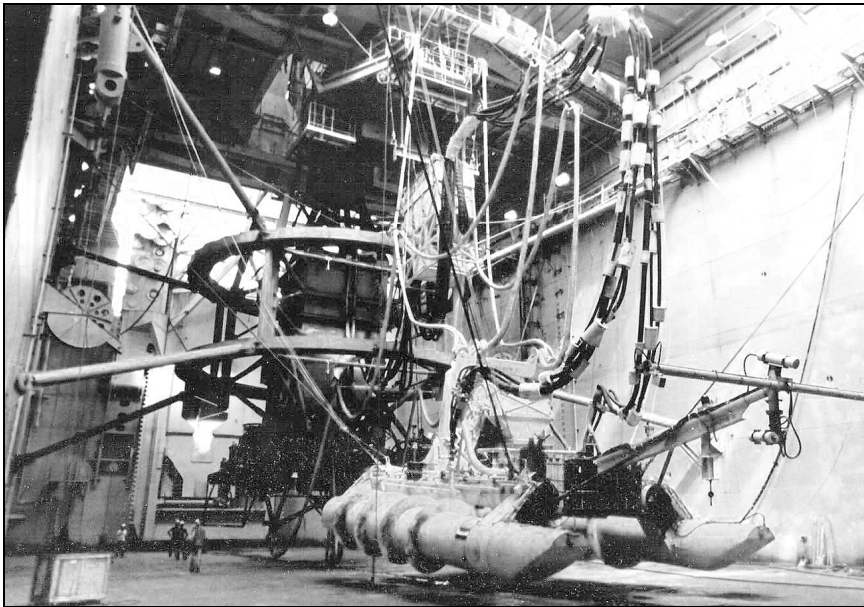


Rys. 4. Wrębiarka do eksploatacji masywnych siarczków polimetalicznych [34]

Z uwagi na twardość i grubość złoże oraz parametry masywnych siarczków całość eksploatacji ma charakter raczej stacjonarny, przy dużym natężeniu sił stosowanych do uzyskania urobku.

Dla pól konkrecji wystarcza jedynie agregat zbierający posiadający głowicę mechaniczną, bądź hydrauliczną zbierającą konkrecje, które następnie transportowane są do rozdrabniacza i dalej poprzez bufor do systemu transportu pionowego. Stąd też agregat taki nie posiada elementów typowych dla klasycznej wrębiarki, natomiast wymagana jest większa mobilności tego urządzenia (rys. 5).

Coraz szersze wprowadzanie automatyzacji i robotyzacji procesów wydobycia sprawia, że przemysł wydobywczy podejmuje eksploatację złóż z coraz to większych głębokości, przy równocześnie trudnych warunkach geologiczno-górnictwowych. Rozwój nowych technologii w przemyśle wydobywczym związany jest z osiągnięciami w dziedzinie elektroniki, informatyce, robotyce, sensorach oraz zaawansowanych materiałach stwarza możliwości miniaturyzacji urządzeń i zwiększa niezawodność ich zastosowań. Zintegrowany w ramach UE system kształcenia inżynierów, między innymi w zakresie górnictwa morskiego, stwarza nie tylko nowe miejsca pracy ale wychodzi naprzeciw realizacji postulatu zwiększania zatrudnienia i bardziej konkurencyjnego rozwoju technologicznego przemysłu wydobywczego w UE. Wzrost konkurencyjności w tej dziedzinie krajów UE, wobec ekspansji takich potęg gospodarczych jak USA, Australia, Kanada, Chiny, Brazylia, Japonia, Indie, Korea, jest wystarczającym uzasadnieniem podjęcia zintegrowanych przedsięwzięć.



Rys. 5. Agregat zbierający kongrecje w ładowni statku *Glomar Explorer* [4]. System opracowany przez zespół Lockheed Martin, wykorzystany przez konsorcjum OMCO

6. Szanse, zagrożenia i perspektywy zagospodarowania złóż

Na początku XXI wieku nie ulega już wątpliwości, że kopaliny oceaniczne stanowią alternatywne źródło występowania wielu deficytowych na lądzie metali strategicznych. W jakim zakresie będą one wykorzystywane okaże się w najbliższej przyszłości. Warunkiem racjonalnej gospodarki kopalinami „morza otwartego” jest zachowanie warunków naturalnych środowiska oceanicznego [36, 46].

Zasoby metali w rozpoznawanych perspektywicznych złożach tlenkowych skupień Fe-Mn oraz nagromadzeń siarczków mogą doprowadzić w przyszłości do istotnych zmian podaży i popytu na światowych rynkach metali strategicznych. Dynamika wzrostu zapotrzebowania na metale wykazuje obecnie tendencję wzrostową, co związane jest z rozwojem przemysłu głównych użytkowników tych metali (Chiny, Indie, Brazylia).

Głównym czynnikiem wpływającym na ekonomiczną ocenę wartości tych kopaliny jest relatywnie wyższa zawartość metali, w porównaniu do zawartości w obecnie eksploatowanych złożach na lądzie oraz ich zasoby prognostyczne [32].

Niezależnie od wielkości szacowanych zasobów złóż lądowych, występowanie w kopalinach polimetalicznych szerokiego spektrum metali i ich wysoka zawartość metali, dają przyszłym producentom gwarancje większej stabilności ekonomicznej przy zagospodarowaniu tych złóż [7, 10, 12, 18, 23, 24, 26].

W odniesieniu do konkretnej polimetalicznej fakt zlokalizowania większości zarejestrowanych działek wydobywczych w polu Clarion–Clipperton, jest potwierdzeniem unikalności tego pola polegającej na z reguły wysokiej konkretyności (ilość konkretyni w kg/m^2) odpowiada podwyższona zawartość w konkretynach metali podstawowych tj. manganu, niklu, miedzi i kobaltu.

Należy podkreślić, że od początku lat 90. XX wieku prowadzone były systematyczne międzynarodowe eksperymentalne badania geologiczno-środowiskowe zmierzające do kompleksowego rozpoznania warunków środowiskowych i oceny szkodliwego wpływu prac wydobywczych na środowisko morskie (badania w ramach programów DOMES (USA), DISCOL (Niemcy), Benthic Impact Experiment/BIE/(Japonia, USA, Rosja, IOM), NAVABA (Chiny), INDEX (Indie) [36, 46].

Wyniki badań na obszarze wydobywczym IOM oraz obszarach Japonii, Rosji i USA oraz Chin wskazują na naturalną zdolność środowiska do rekultywacji dna. W dalszych badaniach koordynowanych przez ISA, przewidywane jest wytypowanie poligonów, w tym na obszarze IOM, oraz włączenie ich w sieć monitoringową pola Clarion–Clipperton (ok. 2 mln km^2), w celu oceny stopnia dopuszczalnej ingerencji oraz ustalenia zakresu kontrolnych badań monitoringowych w trakcie wydobywania (mat. ISA).

LITERATURA

- [1] *Andreev S.I., Gramberg I.S. (Eds.):* Cobalt-Rich Ores of the World Ocean. Ministry of Natural Resources of the Russian Federation. All-Russian Research Institute for Geology and Mineral Resources of the World Ocean, VNIIOKEANGEOLGIA, St.-Petersburg, 2002.
- [2] *Andreev S.I., Cherkashev G.A. (Eds.):* Glubokovodnye sulphidnye rudy okeana: dostizhenia I problem izuchenia. Razvedka I ochrana neдр., 2005, Nr 6, 69–76.
- [3] *Cherkashev G.A., Ashadze F., Glumov A.I.:* Hydrothermal Sulphide Mineralization of the Atlantic: Results of Russian Investigations in 1985-2000. Proceedings of the International Seabed Authority Workshop held on 26-30 June 2000 in Kingston, Jamaica/ISA, 2004, 175–187.
- [4] *Chung J.S.:* Full-Scale, Coupled Ship and Pipe Motions Measured in North Pacific Ocean: The Hughes Glomar Explorer with a 5,000-m-Long Heavy-Lift Pipe Deployed, Int. Journal of Offshore and Polar Engineering, ISOPE, Vol. 20, No. 1, March 2010, 1–6.
- [5] *Cronan D.S. (Ed.):* Marine Minerals Deposits (handbook). CRC Press LLC: 406, 2000.
- [6] *Crowson Ph.:* Markets for Seabed Minerals and Metals. Presentation on International Seabed Authority, Kingston, Jamaica, 2008, 1–19.
- [7] *Glasby G.P.:* Lessons Learned from Deep-Sea Mining. Science Reprint, 2000, 289: 551–553.
- [8] *Glumov A.I.:* Mezdunarodno-pravovoi rezim razvedki i razrabotki mineralnych resursov mezdunarodnogo rajona mors kogo dna. Sovremennye problemy i vozmozhnye puti ich reshenia. Ministerstvo prirodnih resursov i ekologii RF, Federalnoe agenstvo po nedropolzovaniu VNIIOKEANGEOLGIA, Diplomatičeskaja akademija MID Rosji. S. Petersburg, 2008.
- [9] *Glumov I.F., Kuznecov K.M.:* Ocenka perspektiv promyshlennogo osvoenia mestorozdenij železomargancevych konkretyn. Sovetskaja geologia, 1990, Nr 12, 112–120.
- [10] *Glumov I.F., Kuznecov K.M., Prokazova M.S.:* Ocenka znachenija mineralnych resursov Miedzunarodnogo rajona morskogo dna w mineralno syriewom potenciale Rossijskoj Federacii (in russian). Geol. Congress. St.-Petersburg, 2000, 27–29.
- [11] *Halbach P., Manheim F.T., Otten P.:* Co-rich ferromanganese deposits on the marginal seamount regions of the central Pacific basin—results of Midpac’81 Erzmetall, 1982, 35 (9), 447–453.
- [12] *Halbach P., Puteanus D., Manheim F.T.:* Platinum concentrations in ferromanganese seamount crusts from the Central Pacific//Naturwissenschaften, 1984, Vol. 71, 577–579.

- [13] *Hannington M.D., Peterson S., Herzig P.M., Jonnasson I.R.*: Global database of seafloor hydrothermal systems, including a geochemical database of polymetallic sulphides. Prepared for International Seabed Authority Central Data Repository, Ver. 1.0, 2002.
- [14] *Hannington M., Monecke T.*: Global Exploration Models for Polymetallic Sulphide Deposits in the Area: possible criteria for lease block selection under the draft regulations on prospecting and exploration for polymetallic sulphides. Document ISBA 12/C/3 (Part II), 2006.
- [15] *Hein J.R.*: Cobalt rich ferromanganese crust: Global distribution, composition, origin and research activities. In: Minerals Other than Polymetallic Nodules of the International Seabed Authority. Kingston, Jamaica. Proceedings of a Workshop, 2004, Vol. 1, 188-256.
- [16] *Hein J.R.*: Geologic Characteristics and Geographic Distribution of Potential Cobalt-Rich Ferromanganese Crust Deposits in the Area. Chapter 4. In Mining Cobalt Rich Ferromanganese Crusts and Polymetallic Sulphides Deposits — Technological and Economic Considerations, Proceeding of ISA Workshop, Kingston, Jamaica, 2006.
- [17] *Hein J.R., Conrad T.A., Dunham R.E.*: Seamount Characteristics and Mine-Site Model Applied to Exploration — and Mining-Lease-Block Selection for Cobalt-Rich Ferromanganese Crusts. Marine Georesources and Geotechnology, 2009, 27, 160–176.
- [18] *Hein J.R., Conrad T.A., Staudigel H.*: Seamount Mineral Deposits, A Source of Rare Metals for High-Technology Industries. Oceanography, 2010, Volume 23, No 1.
- [19] *Herzig P.H., Petersen S., Hannington M.D.*: Polymetallic Massive Sulphide Deposits on the Modern Seafloor and their Resource Potential. Proceedings of the International Seabed Authority's Workshop on Mineral Resources of the International Seabed Area held in Kingston, Jamaica, 26–30 June, 2000, 109–162.
- [20] *Heydon D.*: Exploration for and Pre-Feasibility of Mining Polymetallic Sulfides — a Commercial Case Study/Proceedings of the International Seabed Authority Workshop held in May 2004 in Kingston, Jamaica/ISA, 2004.
- [21] *Hoffert M.*: Les Nodules Polymetalliques Dans Les Grands Fonds Oceaniques. Une Extraordinaire aventure Miniere et Scientifique Sous-marine. Societe Geologique de France. VUIBERT. Paris, 2008, 205–415.
- [22] *Kotliński R.*: Perspektywy zagospodarowania złóż kopaliny oceanicznych. Centralna konferencja poświęcona obchodom Międzynarodowego Roku Mózg i Oceanów. Mat. Inst. Morskiego. Gdańsk, 1998, 890: 79–96.
- [23] *Kotliński R.*: Metallogenesis of the World's ocean against the background of oceanic crust evolution. Special Papers, 4. Polish Geological Institute. Warszawa, 1999, 1–59.
- [24] *Kotliński R.*: Mineral Resources of the World Oceans — Their Importance for Global Economy in the 21st Century. Proceedings of the Fourth. Ocean Mining Symposium, Szczecin, Poland, September, 2001, 23–27: 1–7.
- [25] *Kotliński R.*: Relationships Between Nodule Genesis And Topography In The Eastern Area Of The C-C region — Meeting of Scientists for the Preparation of a Programme of Work for the Development of a Geological Model of the Clarion–Clipperton Fracture Zone. International Seabed Authority, Nadi, Fiji, 2003.
- [26] *Kotliński R., Parizek A., Rezek K.*: Polymetallic nodules — a possible source of Rare Earth Elements. Proceedings of the 2nd (1997) ISOPE Ocean Mining Symposium, Seoul, Korea, 1997, 50–56.
- [27] *Kotliński R., Szamalek K. (Eds.)*: Surowce mineralne mórz i oceanów. Wyd. Nauk. Scholar, 1998, 127–184.
- [28] *Kotliński R., Mucha J., Wasilewska M.*: Problemy szacowania zasobów złóż koncentracji polimetalicznych na Pacyfiku. Gosp. Sur. Min., vol. 24, z. 2/4 Kraków, IGSMiE PAN, 2008, 257–266.
- [29] *Kotliński R., Stoyanova V.*: Relationship between nodule coverage, morphology and distribution in the Eastern CCZ. 1–13. In: Morgan Ch.L. (Ed.) Prospectors Guide for the Clarion–Clipperton Zone Polymetallic Nodule Deposits. ISA ONZ, Kingston, Jamaica, 2009.
- [30] *Krivcov A.J.*: Globalnaja mineralno-syrijevaja obiespieczennost w XXI wiekie – koliczestwiennyje ocenki (in russian). Geol. Congress. St.-Petersburg, 2000, 360: 133–134.
- [31] *Kulyndyshev A.V.*: Geological and economic assessment of deposits of iron-manganese nodules in the world's oceans. D.Sc. Dissertation, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 1993, 1–46 (in Russian).
- [32] *Lenoble J.P.*: A Comparison of Possible Economic Returns from Mining Deep-Sea Polymetallic Nodules, Polymetallic Massive Sulphides and Cobalt-Rich Ferromanganese Crusts. Proceedings of the International Seabed Authority's Workshop on Mineral Resources of the International Seabed Area held in Kingston, Jamaica, 2000, 1–22; 424–456.
- [33] *Morgan Ch.L.*: Resources Estimates of the Clarion–Clipperton Manganese Nodule Deposits (In: Cronan (Ed.) - Marine Mineral Deposits, CRC. Press LLC, 2000, 145-170.
- [34] *Nautilus Minerals Inc.*, Annual Report, 2006.
- [35] *Nykiel B.M.*: Analiza procesu wydobywania polimetalicznych koncentracji metodą linową, Praca magisterska, ZUT w Szczecinie, promotor prof. Tadeusz Szlangiewicz, 2010.

- [36] *Radziejewska T., Kotliński R.*: Acquiring marine life data while experimentally assessing environmental impact of simulated mining in deep-sea. 2002 ICES Annual Science Conference Copenhagen. Denmark, 2002.
- [37] *Ruszar B.*: Analiza procesu wydobywania polimetalicznych конкреcji metodą hydrauliczną, Praca magisterska, ZUT w Szczecinie, promotor prof. Tadeusz Szelangiewicz, 2010.
- [38] *Rona P.*: Metallogenesis of Marine Mineral Deposits/Proceedings of the International Seabed Authority Workshop held on 26-30 June 2000 in Kingston, Jamaica. Vol. I/ISA, 2004, 69–108.
- [39] *Scott S.*: Proposed Exploration and Mining Technologies for Polymetallic Sulphides. Proceedings of the International Seabed Authority's Workshop Area held in Kingston, Jamaica, August 2006.
- [40] *Shirayev B., Sobota J., Red.*: Projekt koncepcyjny technologii wydobycia конкреcji polimetalicznych, Wspólna Organizacja Interoceanmetal, 2005.
- [41] *Szelangiewicz T.*: Projekt koncepcyjny systemu wydobywco-transportowego do eksploatacji złóż конкреcji żelazowo-manganowych, Politechnika Szczecińska, 1979.
- [42] *Thierry M.*: Projektowanie obiektów oceanotechniki, Politechnika Szczecińska, 1986.
- [43] *Yamazaki T.*: Technological Issues Associated with Commercializing Cobalt-rich Ferromanganese Crusts Deposits in the Area. Kingston, Jamaica, 2006.
- [44] *Yamazaki T.*: Technological Issues Associated with Commercializing Polymetallic Sulphides in the Area/ Proceedings of the International Seabed Authority's Workshop Area held in Kingston, Jamaica, August 2006.
- [45] *Yubko V.M., Melnikov M.I., Kazmin Y.B., Glumov A.I.*: Regional and Local Variability in the Spatial Distribution of Cobalt-Bearing Ferromanganese Crusts in the World Ocean. Proceedings of the International Seabed Authority's Workshop on Mineral Resources held in Kingston, Jamaica, 26-30 June 2000, 162-188.
- [46] *Zhou H.*: Like impact from Exploration and Potencial Exploitation on seamount cobalt-rich crust in Western and Central oligotropic Pacific: chemical and biochemical consideration. Kingston, Jamaica, 2004.