

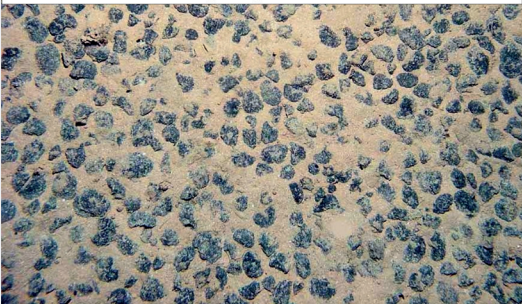
Results of the first phase of the deep-sea polymetallic nodules geological survey in the Interoceanmetal Joint Organization licence area (2001–2016)

PETER BALÁŽ

Interoceanmetal Joint Organization, Szczecin, Poland

Abstract: The Interoceanmetal Joint Organization's exploration licence relate to the area located within the Clarion-Clipperton Fracture Zone (CCZ) of eastern central Pacific. Exploration area covers 75,000 km² and consists of two sectors (B1 and B2). The B2 sector comprises two exploration blocks (H11 and H22), delineated as the most prospective areas. The article presents information based on the data collected during the IOM's exploration expeditions. Data were obtained using the distance methods (bathymetry, side-scan sonar, profiler) and contact methods (box-corer, gravity corer and trawl sampling) of exploration. Exploration area's lithology, stratigraphy, geotechnical properties and general characteristics of seabed sediments and polymetallic nodules are provided. Estimation of mineral resources was carried out using the geostatistical method of ordinary block kriging, supported by Yamamoto correction. Regarding the level of geological knowledge and confidence, the polymetallic nodule resources have been classified within the Inferred, and Indicated Resources categories of the CRIRSCO classification system.

Key words: deep sea exploration, seabed minerals, polymetallic nodules, Clarion-Clipperton Zone

Graphical abstract	Seabed with polymetallic nodules	Highlights
		

- The Interoceanmetal Joint Organization's exploration area, located within the Clarion-Clipperton Fracture Zone (CCZ) of eastern central Pacific, covers 75,000 km².
- Paper provides the exploration area's lithology, stratigraphy, geotechnical properties and general characteristics of seabed sediments and polymetallic nodules.
- Inferred and Indicated mineral resources were determined of the CRIRSCO classification system.

Introduction

The exploration rights of the Interoceanmetal Joint Organization are granted to an area located within the Clarion-Clipperton Zone (CCZ) in the eastern central Pacific Ocean. All activities related to exploration of minerals in the CCZ (the Area – the seabed and ocean floor beyond the limits of national jurisdiction) come under the Law of the Sea – United Nations Convention on the Law of the Sea (1982), the Agreement relating to the implementation of Part XI of the Convention (1994) as well as Regulations on Prospecting and Exploration for Polymetallic Nodules in the Area – regulations established by the International Seabed Authority (ISA). The organization currently has 168 member states, including Slovakia and the European Union as a whole.

The ISA issues legal documents regulating the conduct of research and the future use of the seabed. The IOM's

contract for exploration of polymetallic nodules was granted for 15 years and provided the contractor security of tenure and exclusive right to explore for polymetallic nodules in the exploration area, as well as to move to a contract for exploitation (regulations for exploitation of mineral resources in the Area are under the development process by the ISA). In 2016, the contract was extended for the following 5 years. The exploration area is common for all 6 IOM member states: Bulgaria, Cuba, the Czech Republic, Poland, the Russian Federation and Slovakia, without exactly positiones parts of the area. Only the potential profit will be shared or the country will be able to sell its stake in the joint venture. For this reason, it is planned to transform IOM from a research organization into a joint stock company.

In addition to geological survey and related research, IOM is working on research into the technology of mining and processing of deep-sea polymetallic nodules (PMN), as well as on environmental research.

Locality

The IOM exploration area covers 75,000 km² of the eastern part of the CCZ and consists of two sectors: B1 and B2 with two exploration blocks H11 and H22 (Tab. 1, Fig. 2).

Tab. 1

IOM's Exploration area (sectors and exploration blocks).

Exploration area	Area [km ²]
B1 sector	11 952
B2 sector	63 075
H11 exploration block	5 390
H22 exploration block	4 150
Total	75 000

Survey methodology

In recent decades, several methods have been developed to survey and sample seabed and polymetallic

nodules. Following distance methods were used during IOM expeditions:

Multibeam bathymetry

Bathymetry is used to measure depth and map the bottom morphology using multibeam sonar, while providing information on the character of the seabed based on the intensity of the reflected signal (backscatter). The device is installed on a research vessel.

Geoacoustic survey

Geoacoustic profiling with side-scan sonar is used for detailed mapping of the seabed in a width of about 2 km and obtaining the acoustic bottom profile to a depth of about 100 m (Fig. 3). It helps to identify areas covered by nodules, types of sediments as well as bottom relief and potential obstacles, that may limit future mining. The device is towed behind a reconnaissance vessel 80 to 120 m above the seabed.

Photo and video profiling

Photo and video profiling (Fig. 4, Fig. 5) provides information for the analysis of bottom coverage by nodules

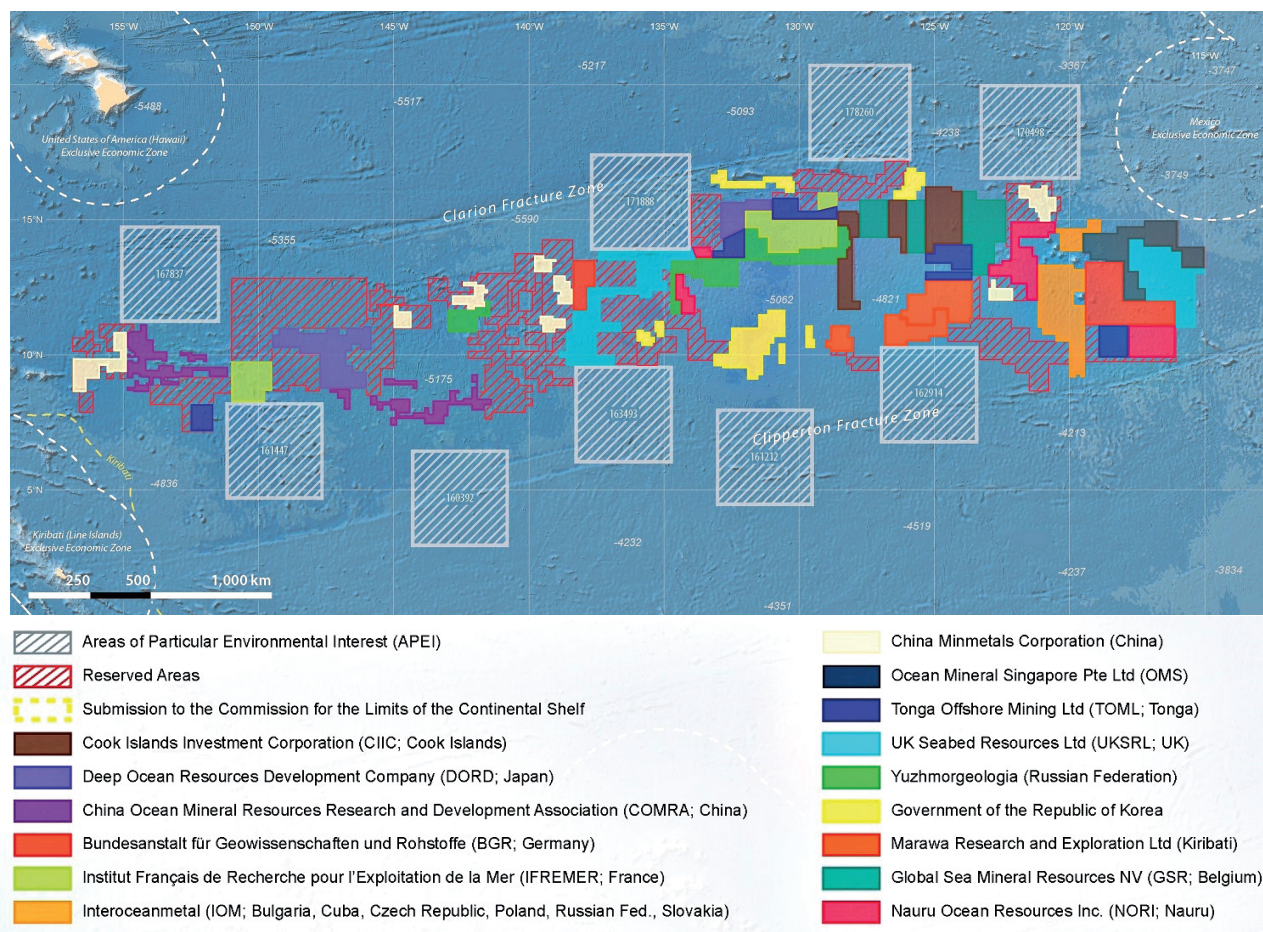


Fig. 1. The outlines of exploration areas in the Clarion-Clipperton Zone at the end of the first contract period between the ISA and IOM (<https://www.isa.org.jm/map/clarion-clipperton-fracture-zone>, 2016).

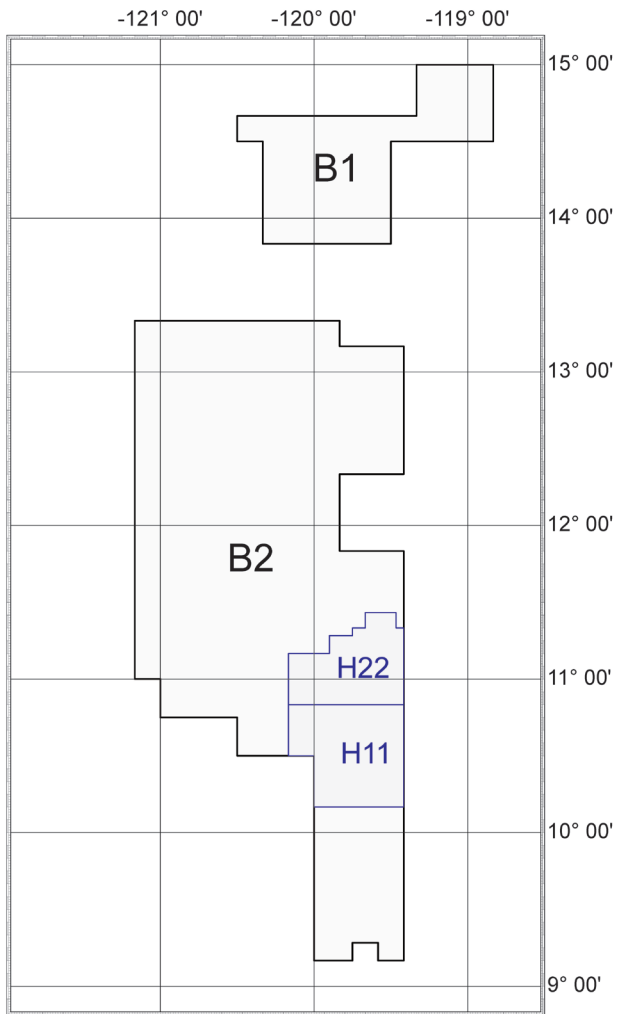


Fig. 2. IOM exploration area (B1 and B2 – sectors, H11 and H22 – exploration blocks).

(individual images of the bottom) and the identification of zones with the occurrence of PMN, as well as the identification of obstacles to potential mining (continuous video recordings). The device is towed behind a research vessel about 4 m above the seabed, individual images cover about 5 m² of the seabed.

Following seabed sampling systems were applied during the exploration expeditions (contact methods):

- sampling of PMK and sediments using a *box-corer device* to obtain a sample measuring 0.5 x 0.5 m,
- sediment sampling using a *gravity-corer device* to obtain a core sediment sample to a depth of 4 m,
- sampling of large-capacity PMN samples by *trawl* obtaining up to 1 000 kg of raw material per sample.

Laboratory chemical analyses and geotechnical measurements were performed by standard methods. Basic analyses and measurements requiring immediate sample processing were performed on board of the research vessel during the shipment.

Geotechnical measurements

Geotechnical measurements of the physical and mechanical properties of the sediments (eg water content, bulk density, rip-off force resistance, vane shear strength, penetration resistance, residual strength) and polymetallic nodules (water content, bulk density, apparent density, compression strength) were performed in the on-board laboratories of the research vessel. Sediment measurements were performed on intact samples directly in the sampling device (box-corer), by cutting with cutting rings in the geochemically active layer (core sample diameter 50 mm,

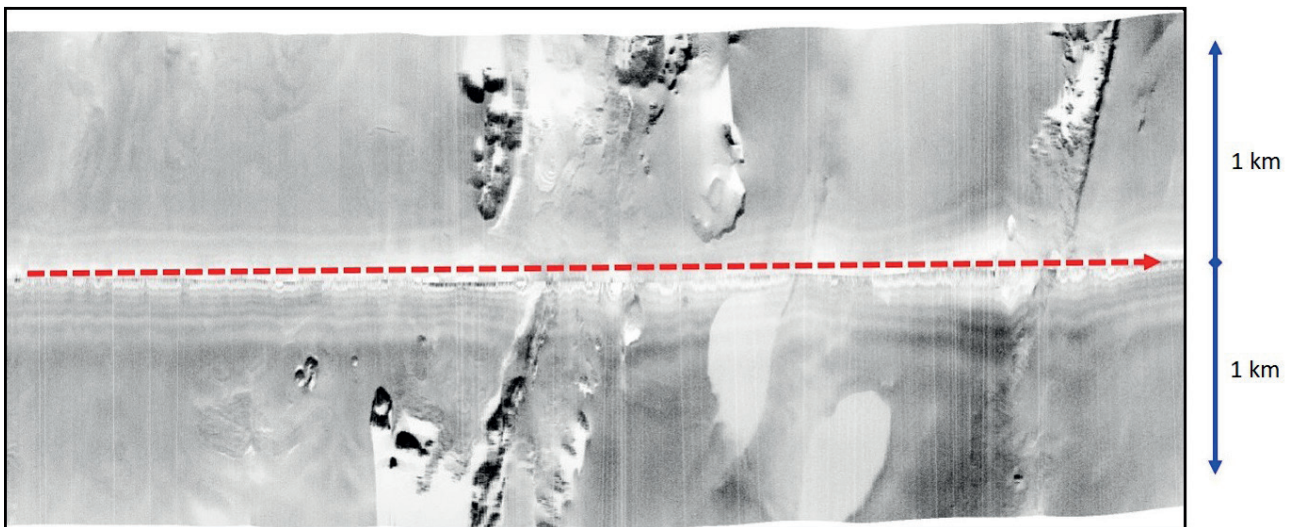


Fig. 3. Example of detailed mapping of the seabed using the side-scan sonar (red arrow – direction of sonar towing, approx. 100 m above the seabed).



Fig. 4. Section of seabed photo showing high nodule abundance, low blanketing (nodule size 2–8 cm, camera positioned approx. 4,5 m above seabed).

water content of the sediment (centrifuge, polycarbonate filter device with vacuum pump), pH and Eh values (electrodes, calibrated pH-meter/ionometer), opal $\text{SiO}_{2\text{am}}$ content (spectrophotometry), metal content in the sediment (atomic absorption spectroscopy), As content (inverse voltamperometry), calcite and dolomite content, organic carbon, concentrations of nitrites, nitrates, phosphates and silicates in porous water (special laboratory measurements and spectrophotometry) and metal contents in pore waters (inverse oltamperometry). All measurements were performed using certified methodologies and standard.

Geotechnical measurements of sediments and nodules included the determination of bulk density, water content,

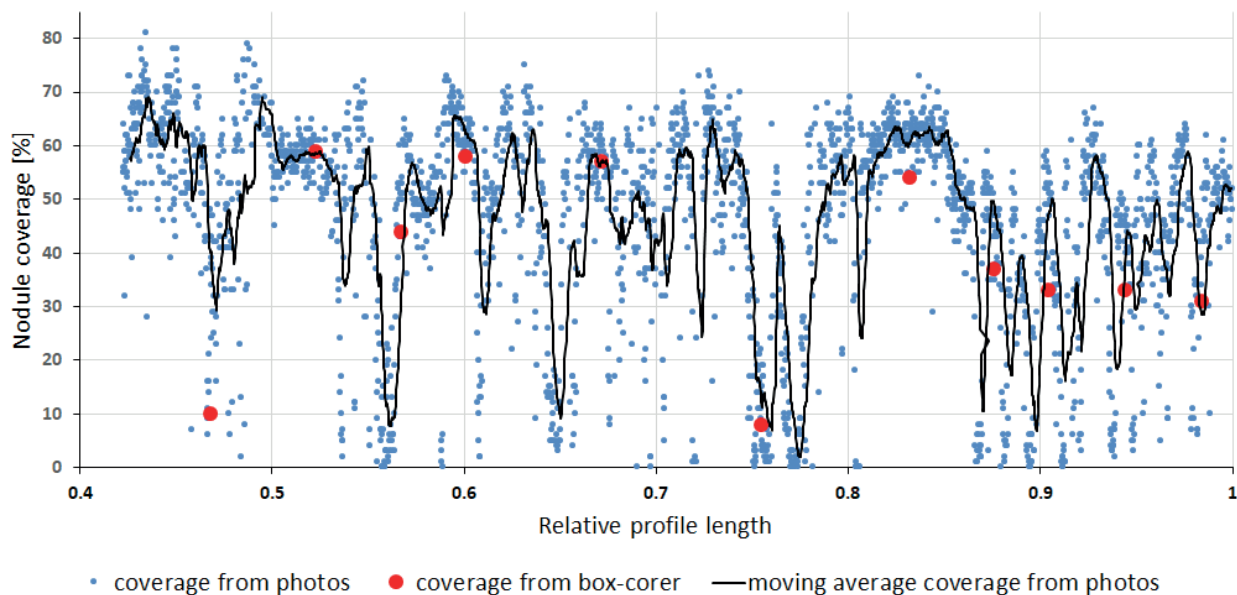


Fig. 5. Demonstration analysis of bottom nodule coverage within the photoprofile No.710.

height 25 mm) and in the underlying sediments (diameter 70 mm and height 50 mm). Depending on the amount of sediment in the sample box, depth intervals 2–5, 10–15, resp. 25–30 cm were tested. PMN samples for analysis were selected from the predominant morphological types and fractions. The determination of the parameters of the physical properties of the nodules was performed in accordance with the methodological recommendations (Andreev, 1994).

Laboratory analyses

Analyses were performed in on-board and land laboratories. The metal content of the samples taken was determined by various methods, including atomic absorption spectroscopy and X-ray fluorescence. Standard methods and equipment were used to determine the pore

dry unit weight, porosity, void ratio and specific density (using the pycnometric method).

Results

The presented results include data relevant for the estimation of resources in the examined area. At the same time, they represent a basic set of data for other purposes, such as the planning of potential exploitation and processing of raw materials, as well as environmental impact assessment.

Overview of expeditions made in the period 2001–2016

Prior to the signing of the exploration contractt between the ISA and IOM in 2001, 21 research expeditions to the CCZ area were made. In the first phase of the contract (2001–2016), 4 expeditions were organised. The work

was carried out in accordance with the five-year action programs approved by the ISA. The work included a geological survey focused on determination of PMN abundance, nodule coverage, determination of metal content and chemical composition of PMNs and seabed sediments, study of their geotechnical properties as well as collection of basic oceanographic, meteorological and environmental data.

Data sets and samples obtained within expeditions during the contract period (2001–2016):

IOM-2001

- 262 km of photo and video profiles (12,540 seabed photos)
- 103 samples of sediment and nodules taken using a box-corer
- 8 samples taken using a gravity-corer
- 700 kg of nodules taken by the trawl
- 44 samples of sediment for pore water and other research
- 110 biological samples

IOM-2004

- 158 samples of sediment and nodules taken using a box-corer
- 250 kg of nodules taken by the trawl
- 2 samples of bedrock (basalt) taken by dredging

IOM-2009

- 295.8 km of seabed profile mapped by side-scan sonar
- 344.3 km of photo and video profiles (13,945 photos)
- 51 samples of sediments and nodules taken using a box-corer
- 740 kg of nodules taken by the trawl

IOM-2014

- 57.2 km of seabed profile mapped by side-scan sonar
- 584.5 km of photo and video profiles (12 profiles, 32,209 photos)
- 52 samples of sediments and nodules taken using a box-corer
- 2 309 kg of nodules taken by trawl
- 94 biological samples

The results of the survey were summarized after particular expeditions in reports on geological and environmental research, in semi-annual reports for IOM Council meetings as well as in annual reports for the ISA. An overview and results of previous survey work have

been summarized in a technical report (Szamalek et al., 2016).

Seabed topography

In 1999, before the start of the 15-year contract period, the IOM carried out a bathymetric mapping of the entire exploration area (sectors B1 and B2). The result of the measurements is a bathymetric map of the seabed, compiled at a scale of 1 : 200,000. The map was compiled with isobat intervals of 25 m.

Lithology and stratigraphy

The studied area is formed by volcanic bedrock (basalts) and mainly clayey-siliceous-calcareous sediments. The sedimentary cover in the CCZ is a mixture of carbonates (e.g. carbonate oozes), red brown clays, and siliceous sediments (siliceous oozes, and siliceous-argillaceous oozes). At the scale of the whole CCZ, the sediment lithofacies exhibit unidirectional gradient trending from predominant carbonate sediments in the SE extreme to predominant red brown clays, and siliceous-argillaceous oozes in the WNW (Kotliński et al., 2009). The sediment cover is characterized by a gradual decrease in the age of sediments, from the Late Cretaceous to the Quaternary, and a gradual decrease in their thickness towards the east, from about 300 m to about 100 m (Kotliński, 2011). Sediment accumulation in the area does not exceed the rate of 10 mm/1,000 years. Participation of the silica-clay ingredients of sediments has been increasing since the Miocene. Changes in the lithodynamic conditions has led to periodic activation of erosional processes on the seabed (ISA, 2010b).

Based on the origin and composition, the bottom sediments within the IOM exploration area can be divided into the following four litho-stratigraphic units (Kotliński, 2010):

- F_{MI} (Oligocene–Miocene) – the lowest lithofacies consisting of biogenic calcareous ooze (foraminifera silty clay and coccolith-foraminifera silty clay – products of primarily biogenic accumulation); the lithofacies thickness is 70 cm and the amorphous silica content amounts to 1.36–7.75 %;
- F_{MII} (Miocene) – represented by X-ray amorphous radiolarian silty clay; the sediments are biogenic, pelagic and detrital, and are partly produced by halmyrolysis and partly by erosion of basalt; the lithofacies is max. 255 cm thick, its amorphous silica content amounts to 0.9–16.3 %;
- F_{CIII} (Miocene–Pliocene) – includes zeolitic clay (phillipsite) or reddish brown clay and denser zeolitic crusts; the zeolitic clay layer is max. 273 cm thick, and its amorphous silica content ranges between 0.48 and 8.8 %;

- F_{CIV} (Pleistocene–Holocene) – consists of siliceous silty clay, ethmodiscus clay and calcareous silty clay; its upper max. 41 cm thick layer gradually transits with depth into lighter-coloured sediment with a mottled appearance; this section is of biogenic and detrital origin, the total thickness is more than 5 m.

Sediments of lithofacies F_{MI} and F_{MII} are associated with the Marquise Formation (Oligocene and Miocene age), the sediments of lithofacies F_{CIII} and F_{CIV} represent the Clipperton Formation (mostly Pliocene–Holocene age).

The maximum thicknesses of the respective lithostratigraphic units, obtained by the sampling device, and selected chemical-physical properties of bottom sediments in the IOM exploration area are given in Tab. 2. The sedimentary cover within the IOM exploration area is about 100 m thick (Dreiseitl & Kondratenko, 2012). The

sediment profile is topped by slightly siliceous silty clay and siliceous silty clay. The top 1–15 cm layer comprises the geochemically active layer (GAL), which is the medium for nodule formation. Sediments of this layer contain 3.04–28.6 % of amorphous silica and are characterised by reduced bulk density and increased moisture content.

Seismic acoustic profiles of the seabed (to a depth of about 100 m) provide data for the identification of geoacoustic complexes. Interpretation led to distinguishment of four geoacoustic facies (units) within the eastern part of the CCZ (Kotliński & Tkatchenko, 1997):

- A – the upper acoustically transparent layer (sedimentary unit of Quaternary to late Miocene age),
- B – the upper stratified (acoustically semi-transparent) layer (sedimentary unit of late Miocene to early Miocene age),

Tab. 2

Chemical-physical properties of bottom sediments in the IOM exploration area (Kotliński, 2010).

Litho-stratigraphic units, age	Lithofacies	Origin	Thickness [cm]	pH	Eh [mV]	SiO _{2am} [%]	CaCO ₃ [%]	C _{org} [%]	Fraction < 4 µm [%]	Water content w [%]	Bulk density ρ [g/cm ³]
F_{CIV} Pleistocene–Holocene	Geochemically active layer (siliceous silty clay, slightly siliceous clayey silt)	eluvial-deluvial	1–15	6,47–8,17	343–622	3,04–28,64	< 14,1	0,13–0,78	5,1–88,6	248–470	1,15–1,23
	(siliceous silty clay/clayey silt)		41	6,87–8,14	390–666	2,10–25,67	< 9,60	0,09–0,75	6,1–86,0	210–437	1,16–1,28
			480	7,27–7,81	422–600	1,73–32,15	< 0,976	0,02–0,31	30,6–84,7	205–309	1,20–1,28
	Biogenic ooze/silty clay (Ethmodiscus silty clay)	deluvial-solifluction	39	7,19–8,05	396–592	13,78–32,54	< 0,083	0,21–0,40	71,9–84,3	224–434	1,16–1,24
	(slightly calcareous silty clay)	eluvial-deluvial	24	7,42–8,31	443–584	7,95–12,1	5,09–9,67	0,40–0,68	64,9–81,3	265–424	1,17–1,23
	(calcareous silty clay)		29	7,10–7,88	427–561	6,51–10,74	10,0–47,0	0,19–0,84	49,9–72,0	247–335	1,20–1,25
F_{CIII} Miocene–Pliocene	Pelagic clay (reddish brown clay, zeolitic clay and zeolitic crust)	eluvial	408	7,01–7,96	389–615	0,48–8,80	< 3,178	0,02–0,75	47,6–88,4	85–303	1,16–1,60
F_{MII} Miocene	Biogenic (siliceous silty clay, radiolarian clayey silt)	eluvial	255	7,19–8,02	476–625	0,90–16,29	< 4,767	0,05–0,15	38,9–80,2	255–599	1,12–1,25
F_{MI} Oligocene–Miocene	Biogenic (calcareous ooze, calcareous silty clay)	biogenic	70	7,47–8,09	505–625	0,50–7,75	18,40–71,14	0,01–0,23	45,1–78,9	150–165	1,33–1,37

- C – the lower acoustically transparent layer (sedimentary unit of early Miocene age),
D – the basement composed of tholeiitic basalt.

The A, B, C and F geoacoustic complexes, identified on the basis of side-scan sonar profiling (Fig. 6), correspond to the seismic A, B, C and F acoustic units described above. Thickness of unit A is on average 10 m and does not exceed 20 m, which is related to topographic variations of the ocean floor, as well as to the deep-sea currents affecting the erosion processes.

Interpretation of eight gravity corer stations (expedition IOM-2001) is shown in the form of profile (Fig. 7). The seventh sampling tube encountered basalt exposure (without sampling).

Sediment properties

Physical and chemical properties of sediments play major role in evaluating protection and preservation of the marine environment. Physical properties of sediments

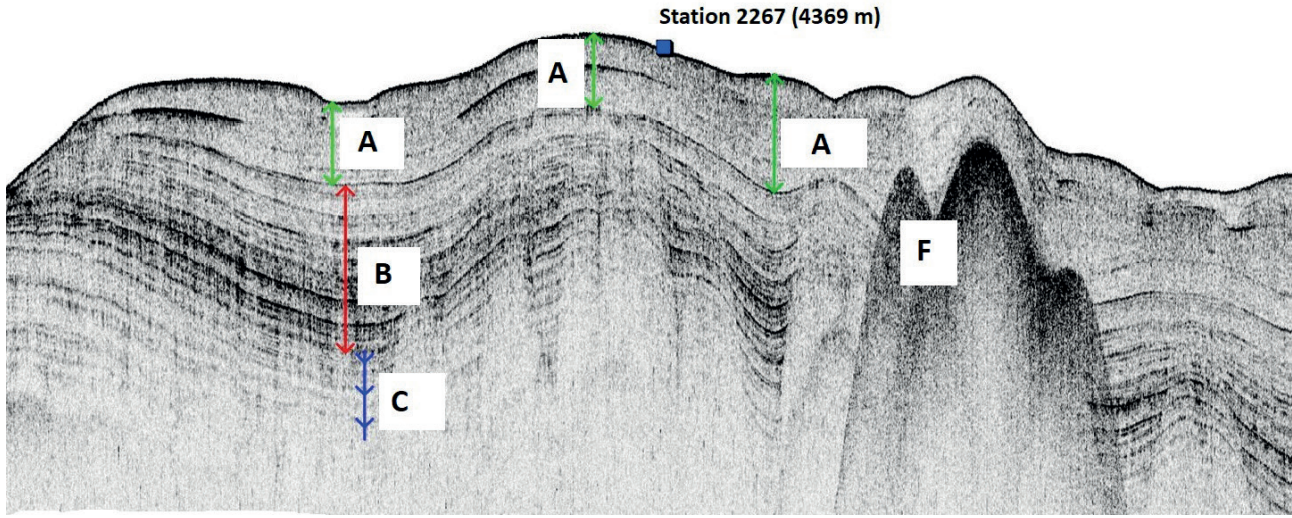


Fig. 6. Interpretation of geoacoustic profile No. 707, fragment 2.7–6.0 km (Dreiseitl & Kondratenko, 2013).

Tab. 3

Physical properties for sediments in the IOM exploration area (Dreiseitl & Bednarek, 2011). Explanations: m – measured value, v – calculated value; data in the reader: min. – max. value, denominator value: number of analyses, ρ – bulk density, w' – true water content (corrected for pore water mineralization), ρ_d – dry unit weight, n – porosity, e – void ratio, ρ_s – specific density.

Sediment type	ρ [g/cm ³]	w' [%]	ρ_d [g/cm ³]	n [%]	e	ρ_s [g/cm ³]
<i>m/v</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>v</i>	<i>v</i>	<i>v</i>	<i>v</i>
Siliceous silty clay	1.17–1.24 208	254–414 218	0.23–0.36 208	86–92 208	6.05–11.23 208	2.48–3.02 208
Slightly siliceous silty clay	1.18–1.28 389	210–404 406	0.27–0.40 389	84–91 389	5.09–10.02 389	2.40–3.07 389
Red pelagic clays with zeolites	1.20–1.33 79	170–302 82	0.31–0.49 79	82–89 79	4.44–7.95 79	2.42–2.86 79
Radiolarian ooze	1.12–1.25 22	255–591 28	0.16–0.35 22	87–95 22	5.95–17.3 22	2.05–3.00 22
Diatom ooze	1.16–1.20 35	319–437 39	0.22–0.29 35	88–92 35	7.66–11.86 35	2.35–2.95 35
Zeolitic crusts	1.32–1.56 14	85–185 12	0.46–0.84 12	70–84 12	2.35–5.11 12	2.46–2.96 12
Σ sum of samples	747	785	745	745	745	745

encountered in the IOM exploration area, with respect to the sediment types, are reported in Tab. 3. Tab. 4 shows Atterberg limit data (the critical water contents of a fine-grained soil) for various sediment types in the IOM exploration area, except for crusts which are impossible to be penetrated by the cone. The results confirm highly plastic and liquid consistencies of the deep-sea sediments.

Mechanical (strength) properties of sediments, useful for future mining operations, are shown in Tabs. 5 and 6. As reported by Dreiseitl (2011), it is estimated that the difference between the values of sediment strength parameters, determined in shipboard lab and in situ is about 28–32 %. Reason thereof is that the deep seabed sediments lose their characteristics after they come onboard in any kind of sampler. The samples taken from the upper layers appear to be well bioturbated, which decreases the sediment's shear strength values.

The variability of physical and mechanical parameters of siliceous sediments in the near-surface layer is mostly dependent on the opal ($\text{SiO}_{2\text{am}}$) content in the sediment. The sediment volume density, as well as shear strength, were found to be inversely correlated with the sediment $\text{SiO}_{2\text{am}}$.

The redox potential (Eh) of sediments in exploration blocks was determined in on-board laboratory using combined platinum electrodes with densified electrolyte. The data analyses show that low Eh values (< 450 mV) of the geochemically active layer seem to result in nodule absence due to reduction of Mn^{4+} , which passes to the pore water and remains dissolved within a layer of sediment. On the other hand, high nodule abundances were delineated where Eh was high ($> + 500$ mV).

The pH values within the examined clays of the H22 exploration block ranged from weakly alkaline (7.50–7.80) to neutral (7.10–7.50). The above values correspond

closely with pH values in all of the sediment layers in the H11 block described in 2009 (Kotliński, 2010). They ranged from weakly alkaline (7.60) to neutral (7.14). In general, the upper sediment layers represent relatively elevated pH values.

Tab. 4

Atterberg limits for sediments in the IOM exploration area (Dreiseitl & Bednarek, 2011). Explanations: m – measured value, v – calculated value, data: min. – max. value, LL – liquid limit, PL – plasticity limit, PI – plasticity index.

Sediment type	LL [%]	PL [%]	PI [%]	Number of analysis
m/v	m	m	v	
Siliceous silty clay	116–241	58–121	58–120	7
Slightly siliceous silty clay	110–186	56–96	55–90	18
Red pelagic clays with zeolites	80–277	38–140	42–137	17
Radiolarian ooze	103–357	51–190	52–167	10
Diatom ooze	142	70	72	1

Polymetallic nodules

General model of nodule formation

The polymetallic nodules in the studied area appear on the ocean floor, usually lying in a semi-liquid surface layer. Quite often they are covered with a thin layer of unconsolidated sediments. Polymetallic nodules are composed of both nuclei and concentric layers of iron and manganese hydroxides and oxides. Beside Mn and Fe, also Cu, Ni, Co are the main metal elements present in nodules.

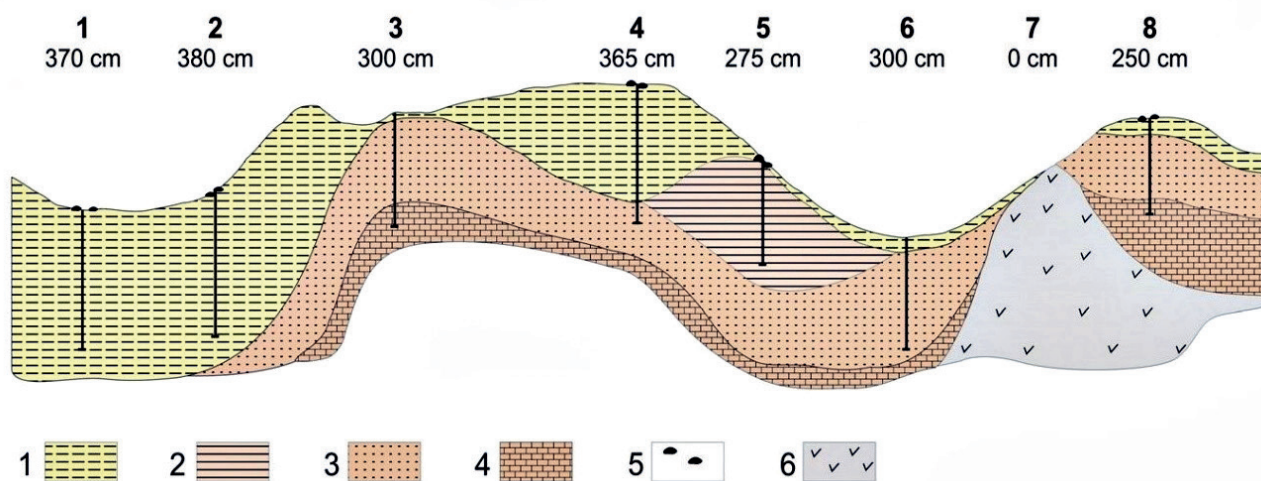


Fig. 7. Geological cross-section of upper layers (up to 4 meters of sea bottom sediments) based on gravity corer sampling (IOM data). 1 – polygenic sediments, 2 – zeolitic clay, 3 – radiolarian oozes, 4 – calcareous oozes, 5 – polymetallic nodules, 6 – basalt.

Tab. 5

Strength characteristics of different types of sediments in the IOM survey area in the depth interval of 10–40 cm, min. – max. values (Dreiscitl, 2011).

Sediment type	Penetration resistance, P [kPa]	Vane shear strength, $\tau_{\max}$, [kPa]	Residual strength, $\tau_{\min}$, [kPa]	$\tau_{\max}/\tau_{\min}$
Siliceous silty clay	0.7–35.7	1.3–8.3	0.9–4.2	1.2–3.6
Slightly siliceous silty clay	1.5–74.5	1.8–14.3	1.0–5.2	1.2–4.6
Red pelagic clays with zeolites	3.4–41.8	6.9–19.0	1.4–12.0	1.6–3.9
Radiolarian ooze	4.2–37.1	3.9–16.8	2.1–4.2	1.7–4.0
Diatom ooze	0.9–4.4	0.9–3.1	0.8–1.7	1.1–2.4
Zeolitic crusts	1 400	–	–	–

Tab. 6

Selected physical and mechanical properties of bottom sediments with respect to the exploration blocks H11 and H22 (samples from expeditions IOM-2009 and IOM-2014).

Sediment type	Expl. block	Sampling interval [cm]	ρ [g/cm ³]	w [%]	Vane shear strength	Numb. of analysis
Slightly siliceous and siliceous-clayey oozes of geochemically active layer ($\text{SiO}_{2\text{am.}} > 10\%$)	H11	2–8	1.16–1.20	327–467	–	20
	H22	2–7	1.17–1.21	323–404	–	31
Siliceous-clayey oozes ($\text{SiO}_{2\text{am.}} > 10\%$)	H11	10–30	1.17–1.22	319–397	2.0–4.3	29
	H22	10–30	1.16–1.24	254–387	1.4–7.1	77
Slightly siliceous and siliceous-clayey oozes ($\text{SiO}_{2\text{am.}} 5\text{--}10\%$)	H11	10–35	1.18–1.23	266–404	1.8–9.4	53
	H22	10–30	1.20–1.25	255–321	2.6–9.1	15
Clayey sediments ($\text{SiO}_{2\text{am.}} < 5\%$)	H11	–	–	–	–	–
	H22	25–40	1.23–1.24	270–271	10.54	2/1
Red dep-sea clays	H11	10–30	1.22–1.24	270–298	4.8–9.5	13
	H22	8–44	1.27–1.33	203–231	11.4–14.1	4
Clayey crusts	H11	2–4	1.32–1.42	137–184	–	5
	H22	–	–	–	–	–
Radiolarian oozes	H11	6–20	1.21–1.29	202–321	13.2–13.4	3
	H22	–	–	–	–	–

Occurrences of nodules with such high abundance as in the CCZ result from complex processes present on the regional and on local scales.

According to the way the nodules are structured, the nodules forming metals can be divided into three groups:

- iron exists in the ocean water as colloidal iron oxy-hydroxide particles and mainly supplies the nodule growth, due to dissolution of calcareous skeletons below the CCD zone (ISA, 2010a),
- cobalt accumulates through the hydrogenetic processes that are unrelated to the biogeochemical dependences (Halbach, 1986),

- manganese, nickel and copper are fully dependent on the biogeochemical cycle. The widely accepted model, proposed by Morgan (ISA, 2010a) divides the process of manganese, nickel, and copper delivery into 4 stages: (1) the first stage involves delivery of metals to the ocean from the land (weathering), the ocean ridge of EPR (volcanogenic) and from atmospheric sources. Metals are adsorbed by the surface of fine particles transported, in the form of suspension, by the ocean currents, (2) the second stage involves consumption of the suspended sediment containing metals by zooplankton.

Metals concentrated in fecal pellets (especially Mn) or in plankton shells (after death) fall on the sea bottom, (3) stage three refers to biological reworking of pellets by benthic fauna and its degradation through bacterial metabolic processes. As a consequence, reduced and soluble metals cations are released. During the early diagenesis in the upper layer of semi-liquid sediment, pore water becomes suboxic even to reducing, which intensifies the process and leach metals. Therefore, the pore waters in bottom sediments are strongly enriched in metal ions, (4) the last fourth stage involves only nodule formation during which Mn is oxidized in the uppermost surface layer and forms such manganese minerals (todorokite, birnessite), interstitial layers of which are able to scavenge metals like copper, nickel and others (Morgan, 2012).

According to the growth model for polymetallic nodules in the CCZ presented by ISA (2010b), the following six main factors control the process of nodule growth:

- a) metals supply – which is in generally not limited by availability of metals in the sea water and the bottom sediments;
- b) nucleus presence (necessary) – nodule nuclei consist of fragments of old nodules, cemented or consolidated sediment, volcanoclastic rocks, fish teeth etc. In fact, all materials which are slightly harder than sediment can serve on the seafloor as nuclei for nodule formation;
- c) Antarctic bottom water (AABW) – this current is considered to be a supplier of oxygen and materials becoming nuclei, especially during the Middle to Late Miocene;
- d) semi-liquid surface layer (geochemically active layer – GAL) – this is a crucial layer for nodule formation, providing components and chemical environment for their growth;
- e) bioturbation – is the mechanism which prevents nodules from fast burial below sediment surface;
- f) internal nodule stratigraphy – is a result of the changing geological history of deep-sea sedimentary basins.

What is crucial for supply of metal ions, is the position of growing nodule in relation to the semi-liquid surface layer. There are three widely accepted models of the nodules growth (ISA, 2010b):

- in semi-liquid surface layer – diagenetic (D-type), called R (rough) type because of their complicated morphology;
- on the boundary of sea water and semi-liquid surface layer as a mixed type of hydrogenetic and diagenetic processes (HD-type), called R + S (rough-smooth) type because of their mixed morphology;

- above the sea bottom, on the surface sediments – hydrogenetic (H-type), called S (smooth) type because of their shape.

The nature of the dominant process that controls the nodule growth depends on the distance from the volcanogenic sources of metals (Hein et al., 2013). At close distance to EPR, hydrogenetic growth is possible. However, with increasing distance its role decreases and is gradually replaced by diagenetic processes.

Polymetallic nodules in the CCZ generally grow very slowly, at rates of 1–10 mm/1,000,000 years (Beiersdorf et al., 2003). The average growth rate for H-type nodules is reported to be about 1 mm/1,000,000 years while D-type nodules grow at a rate of about 5–15 mm/1,000,000 years (Amann, 1992; Kotliński, 1998). Some authors indicate that D nodules can grow even 100 mm/1,000,000 years (Seafloor mining, 2014). Such a slow rate of growth indicates that for the nodules to reach the size of centimeters, stable lasting environmental conditions are required. Although also regarded as low, the accumulation rate of sediments within the area is three orders of magnitude higher and stays at a level of several millimeters per thousand years.

Mineral composition

Mineral composition of polymetallic nodules consists of crystalline (mainly manganese oxides) and amorphous (mainly hydrated iron oxides) mineral phases in different proportions, depending on processes responsible for nodule formation (hydrogenetic or diagenetic).

The key manganese mineral components include the following (Burns & Burns, 1977; Usui et al., 1987; Halbach et al., 1988; Kotliński, 1998; 2003):

- todorokite (10 Å manganite, busserite), forming probably from dissolved manganese in pore waters during early diagenesis,
- birnessite (7 Å manganite),
- vernadite (δ -MnO₂, birnessite of non-regular structure), poorly crystallized hydrogenetic Fe-Mn oxide.

The major iron component is X-ray amorphous iron oxyhydroxide (δ -FeO(OH)), reported to include goethite, ferroxhyte, lepidocrocite, akageneite, hematite or ferrihydrite (Kotliński, 1999; Hein & Koschinsky, 2014). Nodules also contain microscopic detrital silicates, feldspar, plagioclases, quartz and phillipsite (Kotliński, 1998). Components, such as aragonite, apatite, amorphous silica (opal), pyroxenes, amphiboles, barite, spinels, rutile, anatase, clay minerals (chlorites, illite and montmorillonite) occur as accessory minerals (Cronan, 1977; Halbach et al., 1982; Piper & Blueford, 1982; Andreev, 1994; Kotliński, 1998). The cement components are represented by clay minerals and zeolites, which mostly occur in the nodules'

nuclei, sometimes as dispersed clusters. Frequently, the content of SiO_2 and Al_2O_3 in nodules reaches the level of 25–30 %. Occasionally, calcite bioclasts can be found (e.g. *Foraminifera*), typically filled with apatite (Kotliński, 1998).

Chemical composition

Polymetallic nodules of the CCZ are characterized by high abundance and high metals content (especially Mn, Ni, Cu, Co, Mo, Zn and REE) as compared to other ocean nodule-bearing fields of potential economic significance (Kotliński, 1998; Kotliński, 2011). The content of elements in PMN depends on the role of hydrogenetic or diagenetic processes. Nodules, in which todorokite predominates, are usually rich in Mn, Ni, Cu and Zn, while nodules, in which vernadite predominates, are rich in Fe, Co and Pb. The average values of the content of the main metals within the IOM exploration area are in the range: Mn 27.64–31.55 %, Ni 1.22–1.30 %, Cu 0.93–1.30 % and Co 0.16–0.20 %.

With the depth increasing from the north to the south, contents of Mn and Cu increase, while the Ni and Co contents decrease. The higher content of Co is

characteristic for H and D genetic types of nodules in the northern part. Higher grade of Mn, Cu and Ni is recorded in the D-type nodules collected from the central part, while southwards an increase in the amount of Mn (D-type nodule) is apparent (Abramowski & Kotliński, 2011). Iron together with manganese forms the major component of PMN. The average Fe concentration in the CCZ is close to 6 %.

The results of chemical analysis of the joint sample (10 kg) taken by the trawl in the H22 exploration block are given in Tab. 7. X-ray spectrometry was used to determine Ni, Cu and oxides, AES-ICP was used to determine Co and rare earth elements (Tab. 8), gravimetry was used to determine total sulfur and loss on ignition. The contents of the precious metals Pt, Pd, Au and Ag were below the detection limit of the analytical methods used (AAS-F, ETA-AAS, ICP-MS).

In the CCZ, the nodule ores contain also other metals of economic importance, such as Mo, V, Zn, Li, Zr and REE, that are potential by-products of the major metal mining (Hein, 2012; Hein & Koschinsky, 2014; Halbach & Jahn, 2016). Mo contents are in the range 0,048–0,058 %, Zn 0,124–0,168 %, V 0,045 %, Zr 0,036–0,077 %, Li

Tab. 7

Chemical analysis of a joint sample – H22 exploration block (Mackových et al., 2015).

Parameter	Unit	Mean	Min.	Max.	Standard deviation	Relative standard deviation [%]
SiO_2	[%]	14.40	11.50	15.20	0.70	4.89
Al_2O_3	[%]	4.64	4.19	5.15	0.23	4.96
Fe_2O_3	[%]	8.10	7.74	8.52	0.19	2.31
CaO	[%]	2.37	2.22	2.55	0.07	3.10
MgO	[%]	3.34	3.16	3.47	0.08	2.34
TiO_2	[%]	0.43	0.41	0.44	0.01	2.49
MnO	[%]	41.49	40.50	44.10	0.70	1.69
Na_2O	[%]	3.15	2.90	3.50	0.17	5.29
K_2O	[%]	1.34	1.27	1.46	0.04	3.14
P_2O_5	[%]	0.33	0.30	0.37	0.02	5.31
LOI	[%]	15.67	15.40	16.1	0.19	1.20
S total	[%]	0.14	0.11	0.47	0.06	42.7
Au	[mg/kg]	< 0.01	–	–	–	–
Ag	[mg/kg]	< 1	–	–	–	–
Cu	[mg/kg]	13 059	12 550	13 450	224	1.71
Ni	[mg/kg]	12 903	12 490	13 280	218	1.69
Co	[mg/kg]	1 659	1 603	1 763	38.8	2.34
Pt	[mg/kg]	< 0.1	–	–	–	–
Pd	[mg/kg]	< 0.1	–	–	–	–

Tab. 8

Rare earth content in polymetallic nodules of the IOM exploration area (Franzen & Baláž, 2012; IOM data). Samples analysed in Trondheim and ŠGUDŠ-GAL, Slovakia (Chemical analysis of a joint sample – H22 exploration block) (n = number of samples) (Franzen & Baláž, 2012; IOM data).

REE	2010				2011		2015 (H22 block)			
	Min. [mg/kg]	Max. [mg/kg]	Mean [mg/kg]	n	PMK 1 [mg/kg]	PMK 2 [mg/kg]	Min. [mg/kg]	Max. [mg/kg]	Mean [mg/kg]	n
Ce	139.6	177.4	163.3	8	332.0	156.0	149.0	170.0	158.0	30
Dy	11.8	15.9	13.9	8	63.1	18.0	16.5	20.1	18.5	30
Er	10.0	13.6	11.8	8	9.6	6.3	8.6	10.4	9.7	30
Eu	–	–	–	–	6.4	3.6	5.2	6.3	5.8	30
Gd	–	–	–	–	24.2	14.9	20.0	24.8	22.3	30
Ho	3.6	4.7	4.2	8	3.8	2.3	2.7	3.4	3.1	30
La	77.9	100.3	89.9	8	89.0	50.0	83.0	93.0	87.5	30
Lu	1.3	1.6	1.4	8	1.4	1.0	1.2	1.6	1.4	30
Nd	96.4	125.7	113.3	8	104.0	62.8	83.6	103.0	92.9	30
Pr	19.9	26.0	23.4	8	25.1	14.7	19.2	24.0	21.4	30
Sm	22.4	28.4	26.0	8	23.9	14.0	22.5	27.8	25.0	30
Tb	3.7	4.8	4.3	8	4.4	2.3	3.4	4.2	3.7	30
Tm	1.3	1.8	1.5	8	1.8	1.2	1.3	1.6	1.5	30
Yb	9.0	11.2	10.2	8	9.6	6.2	7.9	9.4	8.8	30

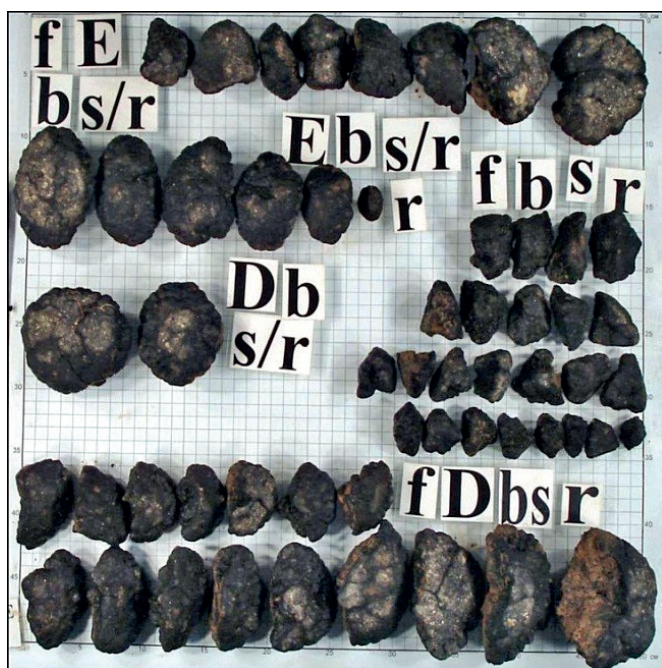


Fig. 8. Morphology of polymetallic nodules. Example of classification according to morphological type. D – discoidal, E – ellipsoidal, b – botryoidal, s – smooth, r – rough, f – fragments.

131 ppm (Hein et al., 2013). Grades of REE in the marine deposits are generally lower than those for the land-based deposits, but in terms of the tonnages they are much greater. Additionally, relative amount of heavy REE (HREEs), which are of higher economic importance than light RRE (LREEs), is quite high when compared to the land ones: HREEs in large terrestrial REE deposits is < 1 %. In PMN it stays for about 26 % of the total REEs (Hein, 2012; Hein et al., 2013; Halbach & Jahn, 2016). The REE grades are related to nodule genetic types: hydrogenetic – the highest, diagenetic – the lowest (Kotliński et al., 1997). Moreover, marine deposits are not contaminated by radioactive elements like Th or U. Results on REE concentrations in the H22 exploration block of IOM exploration area are presented in Tab. 8.

Polymetallic nodules classification

The seafloor polymetallic nodules mostly consist of nuclei and typically concentric layers of iron and manganese hydroxides and oxides. Nucleus can be composed of volcanoclastic debris, lithified sediment, bioclasts or fragments of older nodules.

The following constitute the main morphological nodule types present in the CCZ: discoidal (D), ellipsoidal (E), spheroidal (S), tabular (T), poly-nucleic aggregate (P), botryoidal (B), fusiform (R), irregular (I), fragment of a nodule indicating the morphotype (e.g. fD, fE, fS etc.) and fragments of undetermined morphotype (f). The nodule morphology is conditioned by their mineral composition, nature, size and age of core as well as mechanisms and sources of elements (sea water or pore water) and diagenetic processes (Kotliński, 1998, obr. 8).

The most common nodule textures are: concentric-banding, dendritic, massive and columnar. Layers are frequently cut by other which evidences hiatuses in nodule accretion. Nodules are usually cracked, mostly in radial or tangential pattern. Cracks are effects of internal tension occurring in the processes of dehydration and recrystallization during nodule accretion, or appear as an effect of diagenetic processes. They are usually filled with clay minerals or recrystallized Mn minerals (Kotliński, 1998). The CCZ nodules vary in size from tiny particles visible only under a microscope to large pellets more than 20 centimetres across.

A variety of classifications have been used for polymetallic nodules so far. Those refer to their size and shape, composition and number of cores, thickness of ore crust or mineral and chemical composition of ore material (e.g. Meylan, 1974; Moritani et al., 1977; Halbach et al., 1981; Anikeeva et al., 1984; Haynes et al., 1985; Stackelberg & Beiersdorf 1991; Kotliński, 1998). The one adopted by ISA for the CCZ (ISA, 2010b) defines three main nodule types taking into account their surface features:

- S-type (smooth surface),
- R-type (rough surface),
- S-R type (smooth-rough mixed).

Those refer to the three main genetic nodule types, namely: hydrogenetic (H), diagenetic (D) and mixed hydro-diagenetic (HD). Nodules genetic types are characterized by different mineralogical and chemical composition and different rate of Mn accretion (Tab. 9, Fig. 9).

Nodules of H type have relatively lower average contents of Mn, Ni and Cu and are rich in Fe and Co. In comparison with HD and D types, they are also characterised by higher content of the Rare Earth Elements (Kotliński et al., 1997, 1999). Microcrystals of vernadite and goethite constitute the main mineral components. The Mn/Fe ratio (modulus), one of the most important parameters in determining nodule genotype, is usually below 4. The nodules have smooth surfaces (S-type), generally spheroidal or irregularly spheroidal of rather small modal sizes, usually below 4 cm in diameter. The nuclei of nodules are mostly represented by volcanic glass, often later transformed into clay minerals (usually zeolites) by halmyrolisis, although fragments of bioclasts are also present. Around the core, laminae of Mn and Fe minerals alternate with clay minerals laminae. The nodules are frequently cracked and characterized by the presence of secondary veins filled with clay or manganese minerals. The growth rate is about 1 mm/1,000,000 years. The H type nodules occur usually on calcareous oozes, above the CCD (Carbonate Compensation Depth).

The D type nodules show higher content of Mn, Ni, Cu and Zn, and lower content of REE. The main manganese minerals are todorokite and birnessite. The Mn/Fe ratio generally exceeds 5. Nodules are usually discoidal or ellipsoidal, with modal size ranging from 6 to 12 or more cm, and are characterized by strongly differentiated or asymmetrical structure with rough surfaces (R-type). Nodules' nuclei are usually represented by fragments of older nodules or bioclasts. The nodules show massive, radial, dendritic or collomorphic texture and are characterized by the presence of radial cracks. Nodules are also characterized by clearly



Fig. 9. Main genetic types of nodules: H – hydrogenetic (smooth surface), HD – combined (smooth surface on top, rough from below) and D – diagenetic (rough surface) (Kotliński, 2011).

Tab. 9

Complex characteristics of polymetallic nodules in the CCZ area with respect to genesis, mineralogy, morphology, size and textures (Kotliński, 2010, modified).

Lithofacies	pelagic red clay, siliceous – argillaceous ooze	siliceous-argillaceous ooze, argillaceous-siliceous ooze	argillaceous-siliceous ooze, siliceous ooze
Genetic (growth) type	H – hydrogenetic	HD – mixed hydrogenetic-diatagenetic	D – diagenetic
Occurrence	exposed on sediment surface (extremely low sedimentation rates)	exposed and partly sunken in semi-liquid layer (very low sedimentation rates, biogenic activity)	partly sunken in surface sediment (low sedimentation rates, biogenic activity)
Size [cm]	< 4	4–8	6–12
Surface shape	S (smooth)	S + R (smooth + rough)	R (rough)
Dominant morphotype	spheroidal, polynucleus	elipsoidal, tabular, discoidal, irregular	discoidal, elipsoidal, irregular, fragments
Major Mn-minerals	vernadite (prevalence of amorphous phase, enriched in Fe and Co)	birnessite, todorokite (amorphous and crystalline phases)	todorokite, birnessite (prevalence of crystalline phase, enriched in Mn, Cu and Ni)
Mn/Fe ratio	< 4	4–5	> 5
Nodule abundance	relatively low on average	average	relatively higher on average
Nucleus type	multinucleate, volcanoclastic debris and bioclasts	lithified sediments (clayey-zeolitic bioclasts)	fragments of older nodules, micronodules
Lamination – prevalent lamina thickness [mm]	0,1–1,0	0,1–2,0	> 1,0
Texture	columnar	dendritic, concentric banding	concentric banding, dendritic, massive
Physical properties – volume density [g/cm ³] – porosity [%] – nat. water content [%]	1,97 59 31	1,94 61 32	1,93–1,95 62 32

visible alteration of Mn minerals (black lamina) and Fe (red-brown ones), as well as differentiated growth rate – in the case of manganese minerals it is twice as high as in the case of the iron minerals. Ni and Cu concentrations are associated with laminas of Mn, and Fe minerals are often separated by lamina of volcanic silt. Laminas of Mn and Fe minerals are thicker than laminas observed in the H-type nodules and reach 1.5–2.0 mm. The growth rate of these nodules is estimated to be about 5–15 mm/1,000,000 years (Amann, 1992). This type of nodules occurs on the bottom surface immersed in a semi-liquid layer, usually rest on radiolarian diatomaceous oozes, less frequently on polygenic clays below the CCD.

The HD type is intermediate between the D type and the H one, taking into consideration the form, size and composition. Major manganese mineral is birnessite (7 Å manganite), represented by variable ratios of amorphous and crystalline phases. The Mn/Fe ratio varies between 4 and 5. Nodules are often ellipsoidal, tabular or discoidal (flattened) in shape, with the upper surface being smooth and exposed to the sea water, while the lower surfaces is

rough (S-R type) and immersed in the semi-liquid layer. The typical surficial feature of the HD nodules is the presence of ring-shaped bulge, formed at the contact zone of the ocean water and the semi-liquid sediment.

Within the IOM exploration area, additional subtype of diagenetic D1 nodules has been described. It is associated with higher concentrations of Cu than of Ni. What is more, the crusts (C) grown on hard substrata were reported (Kotliński & Stoyanova, 2009).

Distribution of genetic types of polymetallic nodules in the IOM exploration area is shown in Fig. 10.

In the B1 sector nodules of a diameter of 2–4 and > 8 cm are predominant. Among nodules of genetic type H, 2–4 cm size dominate, whereas the HD and D types are represented primarily by the > 8 cm fraction (the domination is more distinct among the nodules of D type). In the northern and central parts of the B2 area nodules which are 2–4 and > 8 cm in size dominate, while in the south nodules 2–4 cm in size prevail. Nodules of H and HD genetic types are represented mainly by the 2–4 cm fraction. Among type D, 4–6 and > 8 cm size nodules dominate, while among type

D1 all fractions show a virtually homogenous distribution. There is no clear relationship between the nodule size distribution and the depth they were found.

Nodule distribution

Although nodules usually occur on the seabed surface (immersed in the semi liquid active sediment layer), they are frequently blanketed by contemporary sediments in the eastern part of the CCZ. This phenomenon is observed at about 70 % of the sites examined within the IOM exploration area. In general, the blanketing extent increases with depth from the north to the south (Abramowski & Kotliński, 2011).

To describe the blanketing intensity quantitatively, an index of blanketing (blanketing coefficient) was developed. It is expressed by a ratio between the area covered by nodules on a template to the area covered by nodules calculated from the photograph of the bottom at the actual sampling station. The lowest parameter values amount to 1 (no blanketing), whereas at some stations the blanketing level of 100 % is observed.

In relation to the morphology, stations with high nodule abundance were found on all types of seafloor morphology. When compared with horst slopes and trough slopes however, it appeared that clearly greatest number was found on flat terrain (undulating plains).

Within the IOM exploration area nodules appear at a depth range of 3,800–4,750 m, with the highest abundance and frequency recorded at the depth range of 4,300–4,500 m. Some regularities can be linked with the critical depths of calcium compensation – CCD and genetic nodule type (Kotliński, 2003, 2011; ISA, 2010a):

- at CCD of about 4,200 m, there is a dominance of small (< 4 cm), spheroidal nodules of hydrogenic (H) type which are characterised by smooth surfaces, higher content of Fe (10.32 %) and Co (0.23 %) as well as relatively lower Mn, Ni and Cu rates;
- between 4,200 and 4,400 m hydro-diagenetic (HD) type nodules with high content of Mn (> 30.5 %), Ni and Cu and relatively lower content of Co (< 0.18 %) are predominant;
- below CCD (> 4,500 m) one can find diagenetic (D) nodules, discoidal and ellipsoidal ones of larger size (6–12 cm) and with rough surfaces.

Tab. 10

Basic physical parameters of nodules in the IOM exploration area in respect to the cruises (values in a counter: min-max, value in a denominator: mean, n = number of analysis).

Cruise	Water content w [%]	Bulk density ρ [g/cm ³]	Dry nodule density ρ_d [g/cm ³]	Porosity n [%]	Void ratio e	Specific nodule density ρ_s [g/cm ³]	Natural water content w _n [%]
2001 n = 227	<u>38–69</u> 47	<u>1.70–2.06</u> 1.95	<u>1.01–1.50</u> 1.33	<u>55–68</u> 60	<u>1.21–2.15</u> 1.53	<u>3.08–3.75</u> 3.35	<u>28–41</u> 32
2004 n = 308	<u>38–63</u> 48	<u>1.77–2.08</u> 1.95	<u>1.09–1.50</u> 1.31	<u>54–69</u> 62	<u>1.18–2.18</u> 1.62	<u>3.13–3.65</u> 3.43	<u>28–39</u> 33
2009 n = 173	<u>36–57</u> 46	<u>1.83–2.06</u> 1.97	<u>1.18–1.51</u> 1.35	<u>53–66</u> 61	<u>1.14–1.96</u> 1.57	<u>2.98–3.68</u> 3.46	<u>27–37</u> 32
2014 n = 205	<u>29–71</u> 47	<u>1.77–2.27</u> 1.97	<u>1.03–1.75</u> 1.34	<u>46–72</u> 62	<u>0.86–2.56</u> 1.62	<u>3.05–3.68</u> 3.49	<u>22–42</u> 32

Tab. 11

Basic physical parameters of nodules in the IOM exploration area in respect to nodule genetic types (Coulfal & Dreiseitl, 2008; values: mean of n = 514).

Genetic type	Water content w [%]	Bulk density ρ [g/cm ³]	Dry nodule density ρ_d [g/cm ³]	Porosity n [%]	Void ratio e	Specific nodule density ρ_s [g/cm ³]	Natural water content w _n [%]
D	47	1.95	1.33	61	1.57	3.40	32
D ₁	49	1.93	1.30	62	1.64	3.41	33
HD	47	1.94	1.32	61	1.55	3.36	32
H	45	1.97	1.36	59	1.46	3.35	31

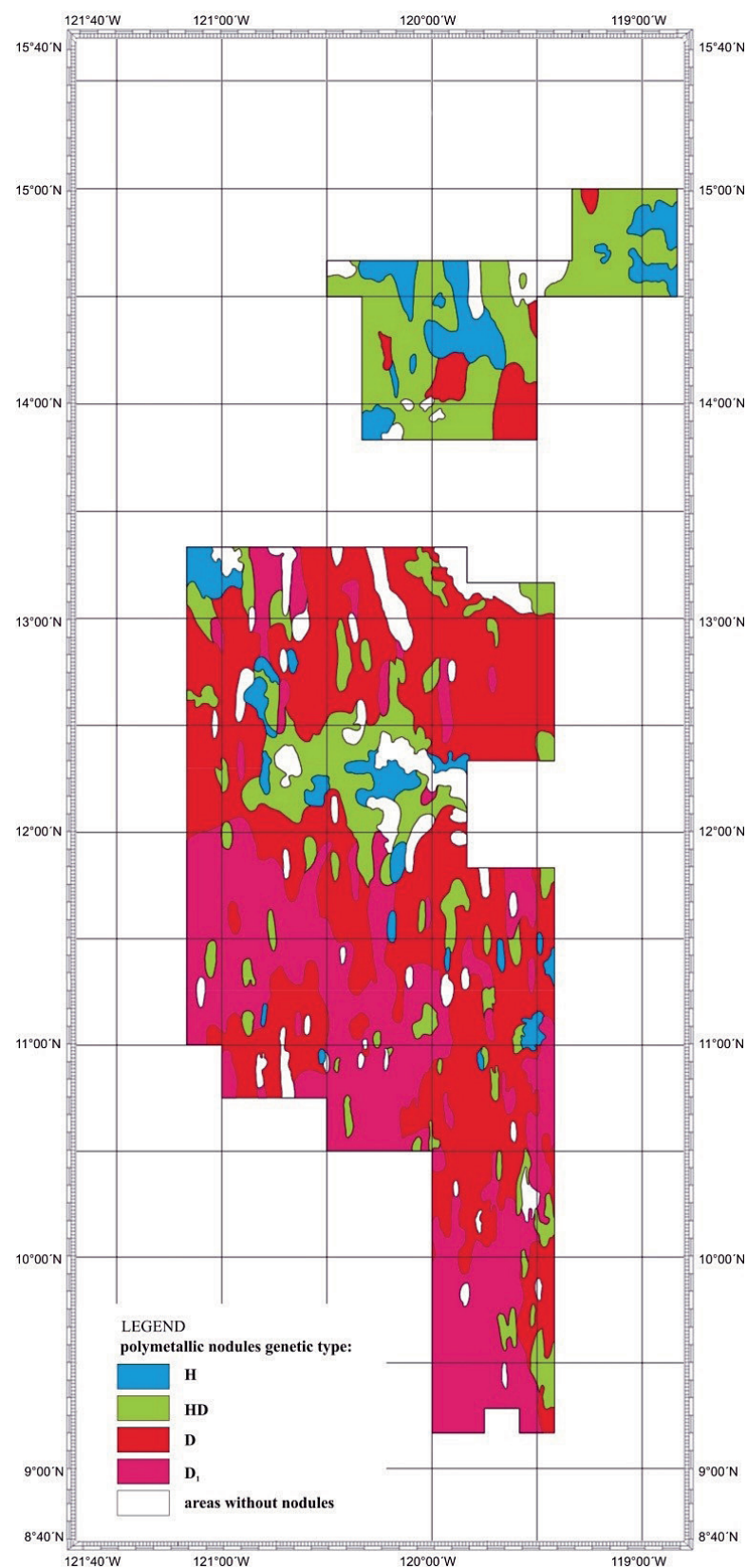


Fig. 10. Distribution of genetic types of polymetallic nodules in the IOM exploration area (H – hydrogenetic, HD – combined, D, D₁ – diagenetic type, white color – nodule free areas).

Tab. 12

Nodule uniaxial compression strength in relation to nodule size (Dreiseitl, 2012).

Fraction [cm]	Uniaxial compressive strength [MPa]			Number of trials
	min	max	mean	
0–2	1.80	6.20	3.26	25
2–4	0.38	3.96	1.92	53
4–6	0,24	4.32	1.75	59
6–8	0.24	3.96	1.26	56
8–10	0.33	2.04	0.81	37
10+	0.12	1.48	0.68	17

Generally, in the direction from N to S, the number of H and HD nodules with modal size < 6 cm decreases, while the amount of D-type nodules with a modal size of > 6 cm gradually increases (Kotliński, 2003; Kotliński, 2011). This is reflected also in spatial distribution of metal content.

Geotechnical properties of polymetallic nodules

Physical, mechanical (strength) and technological properties of nodules described below were investigated by IOM in context of future employment of proper mining technology and transportation (Dreiseitl, 2012).

The basic physical properties, which have to be determined on board immediately after the nodules are retrieved from the boxcorer or dredge samplers, are water content and bulk density (volumetric density). In addition, some other properties, such as dry nodule density (drying take place 72 hours at 105 °C), porosity, void ratio, and specific nodule density are calculated. Natural water

content (ore based water content, w_n) is the ratio of the mass of evaporated water to the mass of wet nodule specimen. While the water content (w) and the natural water content (w_n) analysis, the salt content in the sea water present in the nodule pores, assumed as $M = 35\%$, needs to be taken into account. It confirms that the sea water accounts for 1/3 of the total nodule weight, which conclusion may be of major consideration for the loading of cargo ships with nodules. Basic physical parameters of PMN investigated by IOM are presented in Tab. 10 and Tab. 11.

Statistical analysis of physical parameters of nodules shows some relationships in respect to nodule fractions. Small-size nodules are of comparatively low density and high moisture content in relation to larger-size nodules, while the maximum density and minimum water content is observed for nodules of 8–10 cm size-fraction. For nodules of size >10 cm some gradual de-compaction takes place, which is probably related to the increasing age of nodules.

A single mechanical (strength) property, routinely determined in an on-board laboratory is the uniaxial compressive strength, expressed in MPa. The characteristic expresses the amount of stress that needs to be applied to break a nodule. As reported by Dreiseitl (2012), it is not dependent on the nodule genotype, as opposed to the nodule morphotype (spheroidal nodules are harder than discoidal and ellipsoidal ones) and, especially, nodule size (the smaller the nodule, the higher the compressive strength value). Value of the parameter is given in Tab. 12, while Fig. 11 illustrates trends in the uniaxial compressive strength measured during two cruises (2001 and 2004).

The knowledge on technological properties of nodules is essential for mining and transportation of nodules from

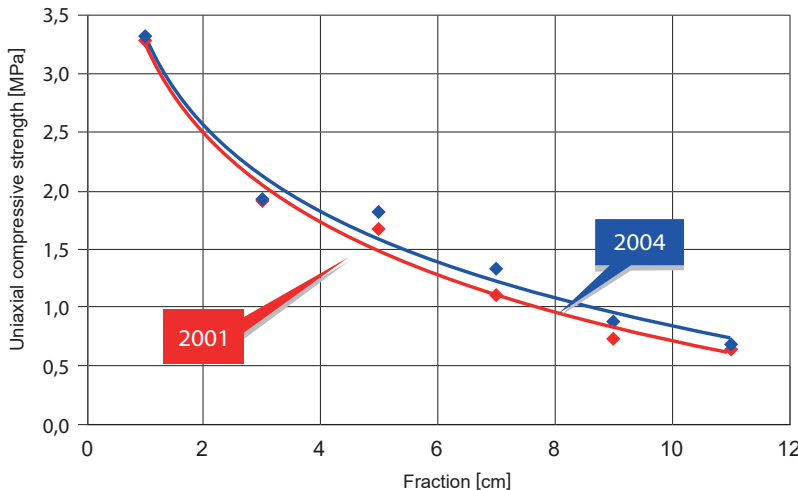


Fig. 11. Uniaxial compression strength of nodule samples obtained during expeditions IOM-2001 and IOM-2004 (Dreiseitl, 2012).

the mine site to an onshore processing plant. The following technological properties were determined in this respect (Dreiseitl, 2012):

- rip off force resistance (kPa);
- nodule apparent density (kg/m^3);
- angle of repose (or slope angle) ($^\circ$, degree).

The rip off force is the force needed to separate a nodule from the sediment, and is expressed in newtons (N). In practise however, it is the nodule resistance to the rip off force that is being determined. Thus, the area of nodule-sediment contact must be additionally calculated. Therefore, the rip off force resistance is expressed in kPa. The rip off force is determined directly on nodules in the boxcorer upon retrieval. The characteristic can be of great importance for certain techniques of nodule collection on the sea floor. The analysis shows there is no relationship between nodule morphotype and rip off force resistance, however the maximum values of the rip off force resistance of large nodules (8–10 and 10+ cm) are lower than the maximum values of the medium-sized nodules (4–6 and 6–8 cm). The parameter values in relation to nodule fraction are presented in Tab. 13.

Tab. 13

Rip off force in respect to nodule fraction (IOM-2009 cruise, all morphotypes).

Fraction [cm]	Rip off force resistance [kPa]			Number of trials
	min.	max.	mean	
4–6	0.32	1.78	0.87	34
6–8	0.21	1.72	0.68	72
8–10	0.23	1.16	0.56	26
> 10	0.33	0.84	0.60	5

It is believed that the nodule surface, rough on the bottom and smooth at the top, plays a major role in the resistance, i.e. rough surface increases the force needed for a nodule is ripped off from the sediment when compared with the force necessary to rip off a smooth-surfaced nodule.

The nodule apparent density and angle of repose will be important in loading operations, whereby nodules are loaded onto the transporting vessel. The properties were determined during the processing of the large-volume samples recovered by trawl during IOM-2009 and IOM-2014 cruises (Tab. 14).

The nodule apparent density r_{app} provides information on the amount (by weight, kg) of nodules that can be placed in a 1 m^3 container. The mean apparent density of nodules (cruise IOM-2009, 3 trials) was calculated to be $r_{app} =$

$1,242 \text{ kg/m}^3$. After the container with nodules was shaken and refilled, the maximum apparent density of nodules was $r_{appmax} = 1,342 \text{ kg/m}^3$.

The angle of repose was determined as the tangent of the angle α between the height of nodule heap and half-diameter of the heap. The angle obtained for the sample trawled during IOM-2009 cruise was $\alpha = 37^\circ$ and during IOM-2014 cruise $\alpha = 31^\circ$ (Tab. 14).

Tab. 14

Nodule technological parameters – selected results from IOM-2009 and IOM-2014 cruises (mean values).

	Nodule apparent density, max. [kg/m^3]	Angle of repose [stupne]
H11 block (IOM-2009)	1.342	37
H22 block (IOM-2014)	1.229	31

Nodule abundance

Nodule abundance can be estimated in two ways:

- from ground-truth data by simply dividing the weight of recovered nodules by the surface area covered by the open jaws of the sampler ($\sim 0.25\text{--}0.5 \text{ m}^2$ coverage);
- by estimating the percentage of nodule coverage of the seafloor using a sonar or photography, and then converting this into abundance using calibration factors.

Both methods give slightly different results, which is caused by many factors including the fact that the blanketed nodules are hardly visible in photographs (Kotliński & Stoyanova, 2009), or the areas examined were of different sizes. Rühlemann et al. (2011) reported correlation between the backscatter values in the second method with the size of nodules rather than with their number.

Nodule abundance is usually given in units of kg/m^2 and mostly refers to wet samples. So far, analysis of spatial distribution of nodule abundance within the CCZ shows its great variability (Morgan, 2009). The nodule abundance within the IOM exploration area varies significantly between $0.1\text{--}28.4 \text{ kg/m}^2$.

Description of the deposit

Prospective ore bearing fields for nodule mining have been delineated within the B1 and B2 sectors where wet nodule abundance reaches not less than 10 kg/m^2 and the slope inclination angles do not exceed 7° . The total area amounts to about $33,900 \text{ km}^2$ (Fig. 12). The topography of the seabed has a significant influence on the contours,

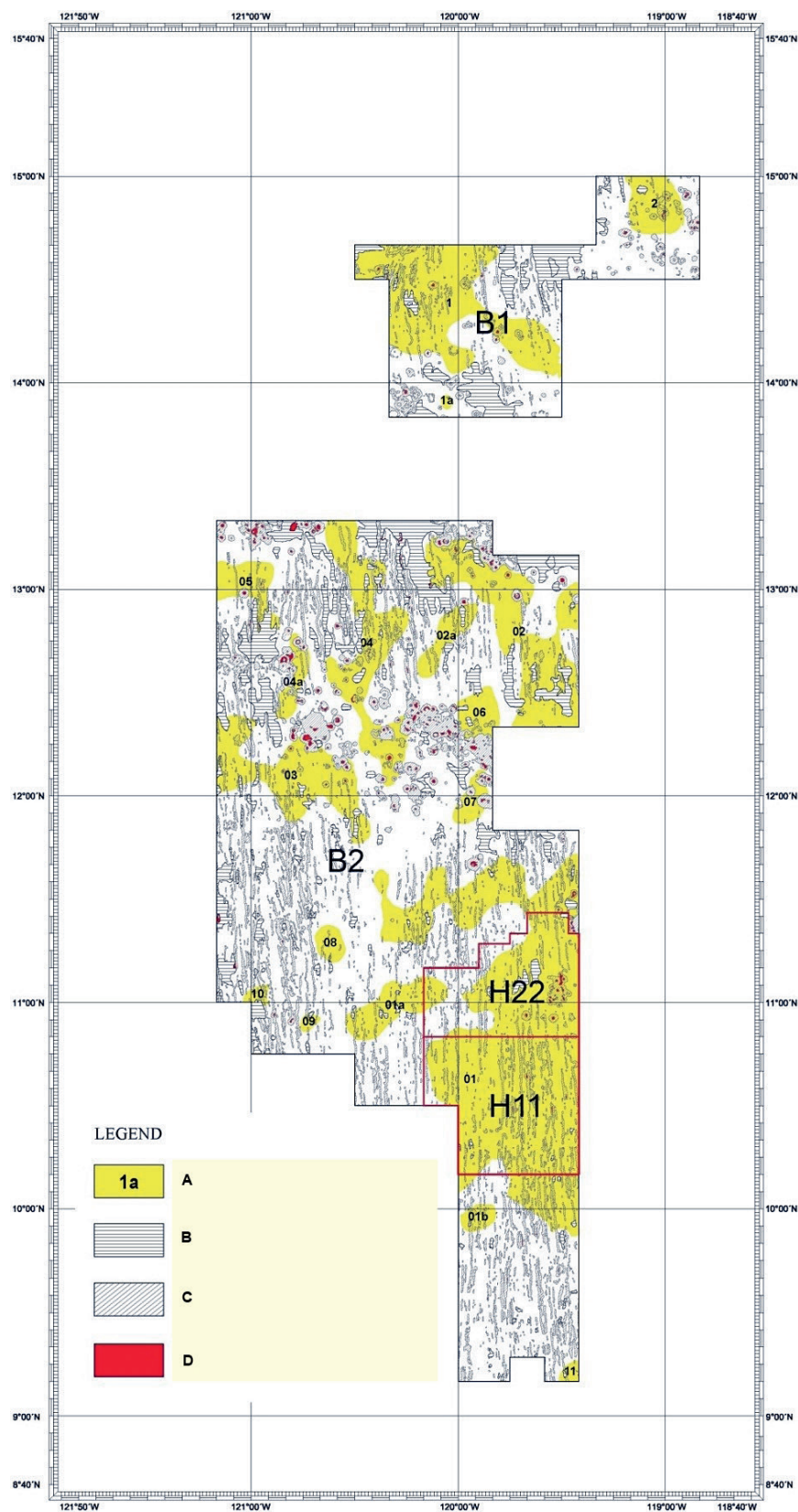


Fig. 12. Ore areas of the IOM exploration area (A – areas with average nodule abundance min. 10 kg/m², B – seabed areas with a slope over 7°, C – nodule free areas, D – micro-areas with a high nodule abundance).

sizes and forms of ore deposits. The contours of ribbon-like deposits have a width ranging from 2 to 10 km and reach up to several tens of kilometres in length, generally following the contours of depressions and ridges. Similarly, the mantle-like deposits have widths reaching 70 km and lengths of up to 120 km, and are characterized by large differences in their sizes and variations (Kotliński, 2003).

Within the boundaries of the B2 area, two exploration blocks were delineated: H11 and H22, within the H11 and

H22 exploration blocks ore areas have been outlined, which form exploitable blocks: H22_NE, H22_MID, H11_PR2, H11_PR3 and H22_NW. The most promising one is H22_NE, consisting of 4 ore bodies: RZ_09, RZ_10, RZ_11 and RZ_12, an example of ribbon-like ore deposit. The total area of ore bodies is 625.3 km². The density of sampling grid is 1 station/31 km². The water depth at the sample sites ranged from 4,249 to 4,501 m. The sample-based average PMN abundance is 15.7 kg/m² (wet conditions). The diagenetic type of PMN is prevalent. Nodules blanketing coefficient ranges from 0 (no blanketing) to 1.6.

Estimation of resources

The polymetallic nodule resources were estimated in two stages. During the first stage (2007), the overall resources were estimated for both of the exploration sectors B1 and B2, by two working groups (Mucha et al., 2007; Shanov et al., 2007). Both working groups carried out the estimation independently focusing on the resources of polymetallic nodules and selected metals: Mn, Ni and Mo (Group 1) and Co, Cu and Zn (Group 2). The results of this estimate were based on data obtained during cruises up to 2004, which focused on regional research. During the second stage (2011, 2015), the resources of nodules and major metals (Co, Cu, Mn and Ni) were estimated within the exploration blocks H11 and H22 in the central part of sector B2. The data source were expeditions organized in 2009 and 2014 and subsequently the resources were estimated (Mucha et al., 2011; Mucha et al., 2015). In 2016, mineral resources were classified according to the CRIRSCO system, and included in the project summary, provided in the technical report (Szamalek et al., 2016).

Only nodules located in the surface layer to a depth of about 10–15 cm are included in the estimation of resources. Deeper buried nodules, which also occur in the IOM exploration area, were not taken into account, due to the assumed mining methods. Due to the high variability (usually an order of magnitude higher than the variability of the metal content), the nodule abundance, given in kg/m², is considered to be a key parameter in estimating the mineral resources. The way nodules are placed on the seabed (in the surface layer), defines the deposit as two-dimensional, to which the methodology of resources estimation was adapted.

Estimation method

The resources of polymetallic nodules and metals contained in them were estimated separately in the B1 and B2 exploration areas, and in the H11 and H22 exploration blocks. The estimation of polymetallic nodules, metal resources contained in them and the mean grades of metals within the exploration blocks were accomplished with the

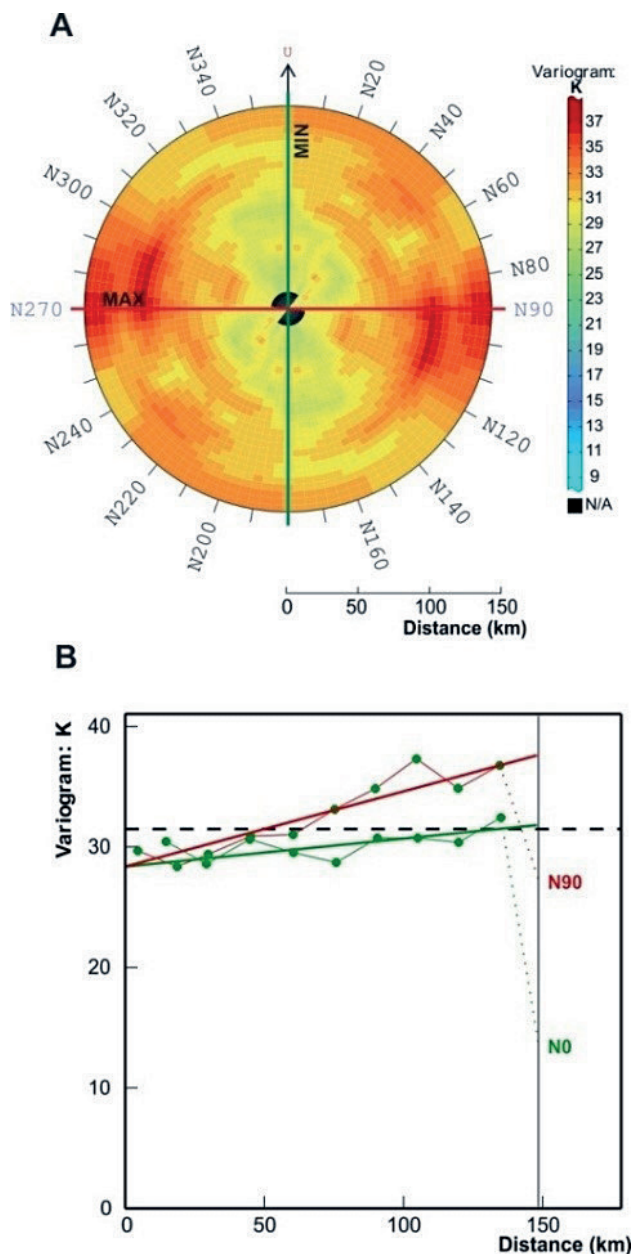


Fig. 13. Directional semivariogram map (A) and semivariogram models (B) for the maximum (red solid line) and minimum (green solid line) variability of nodule abundance in the IOM exploration area (combined data from the B1 and B2 sectors) (Szamalek et al., 2016).

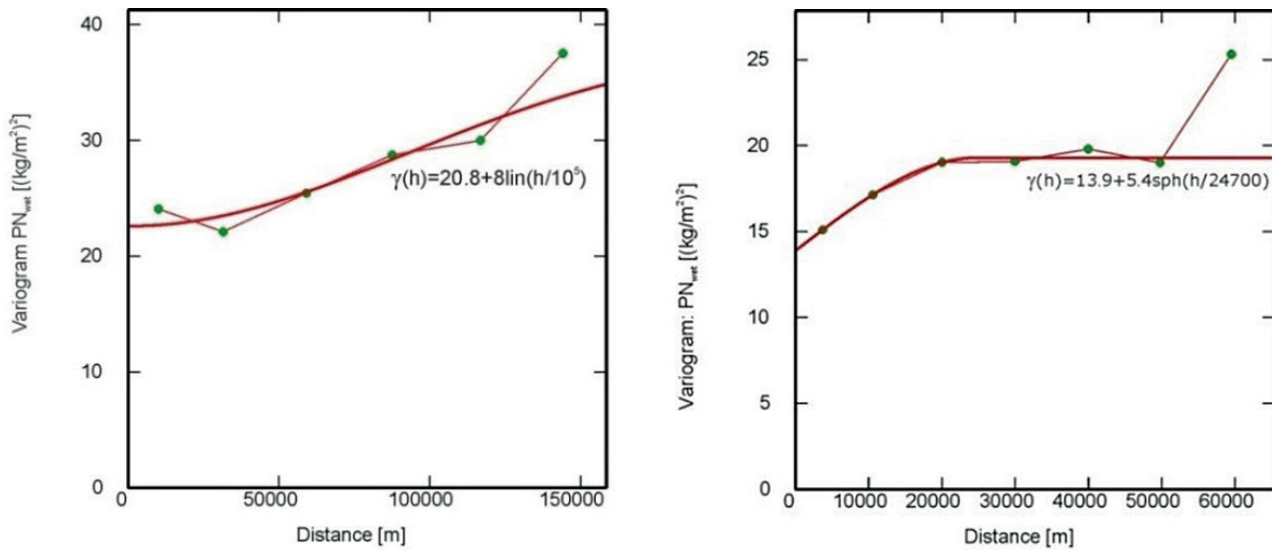


Fig. 14. The empirical omnidirectional semivariograms (green points) of nodule abundance and metal grades, and their spherical models (solid red lines) for data from the H11 (left) and H22 (right) exploration blocks (Szamalek et al., 2016).

geostatistical method of ordinary block kriging (Journel & Huijbregts, 1978; Matheron, 1963) supported by Yamamoto correction (Yamamoto, 2005). Prior to the estimation, the structures of spatial variability of deposit parameters (nodule abundance and metal grades) were modelled using the variography (directional and omnidirectional semivariograms). The estimation was carried out for basic 500 x 500 m calculation blocks located within ore bodies, with the exclusion of barren zones, submarine volcanic zones and zones where the ocean-floor slope exceeded 7°.

The structural geostatistical description of variability of nodule abundance illustrated by directional semivariogram maps for combined data from the B1 and B2 exploration areas reveal weak parameter anisotropy at the large scale of observation, especially for distances over 50 km and strong local variability represented by high nugget effect (Fig. 13). The minimum nodule variability direction is almost aligned north to south, while the maximum variability direction is orthogonal to it and almost east to west. The orientation towards the minimum variability direction is generally parallel to the elongation of particular ore bodies.

In the ordinary kriging procedure the equations of empirical semivariogram models were applied (Fig. 14). The estimation of resources for each calculation block involved the abundance and metal grade values derived from eight closest sampling stations in the search neighbourhood. The total resources of the exploration areas and blocks were obtained by summation of values estimated for basic calculation blocks. Modelling correctness was verified with the cross-validation procedure (Isaaks & Srivastava, 1989).

The average values of nodule abundance and metal contents for H11 and H22 exploration blocks are given in

Tab. 15. The conversion factor from wet to dry nodules is 0.7. The values of the standard error of estimation of sources for the cut-off value 10 kg/m² in the basic calculation blocks are relatively low and reach about 8 % for sector B1, 3 % for sector B2 and 5 % for H11 and H22 exploration blocks.

Tab. 15

Mean values of polymetallic nodule abundances and metal grades in the H11 and H22 exploration blocks, calculated in 500 x 500 m basic blocks for cut-off abundance PNwet = 10 kg/m² (Mucha et al., 2011; Mucha et al., 2015).

Parameter	H11	H22
Nodule abundance PN _{dry} (dry nodules) PN _{wet} (wet nodules)	8,86 [kg/m²] 12,65 [kg/m²]	8,30 [kg/m²] 12,20 [kg/m²]
Cobalt (Co)	0,16 [%]	0,17 [%]
Copper (Cu)	1,29 [%]	1,29 [%]
Manganese (Mn)	31,74 [%]	31,04 [%]
Nickel (Ni)	1,31 [%]	1,30 [%]

The abundance/tonnage curves for H11 and H22 exploration blocks are shown in Fig. 15 and Fig. 16.

An example of the nodule abundance map in the H11 exploration blocks is shown in Fig. 17. The nodule abundance and metal contents were estimated in basic calculation blocks with dimensions of 500 x 500 m. Nodule free areas, volcanic zones and areas where the slope of the ocean floor exceeds 7° were excluded from the estimation.

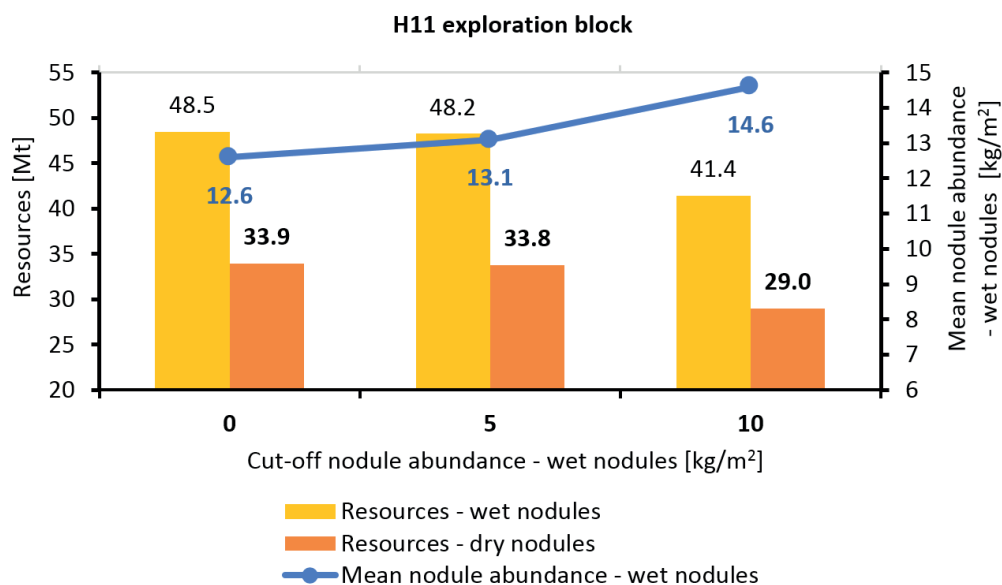


Fig. 15. Nodule Abundance – Tonnage graphs for H11 exploration block.

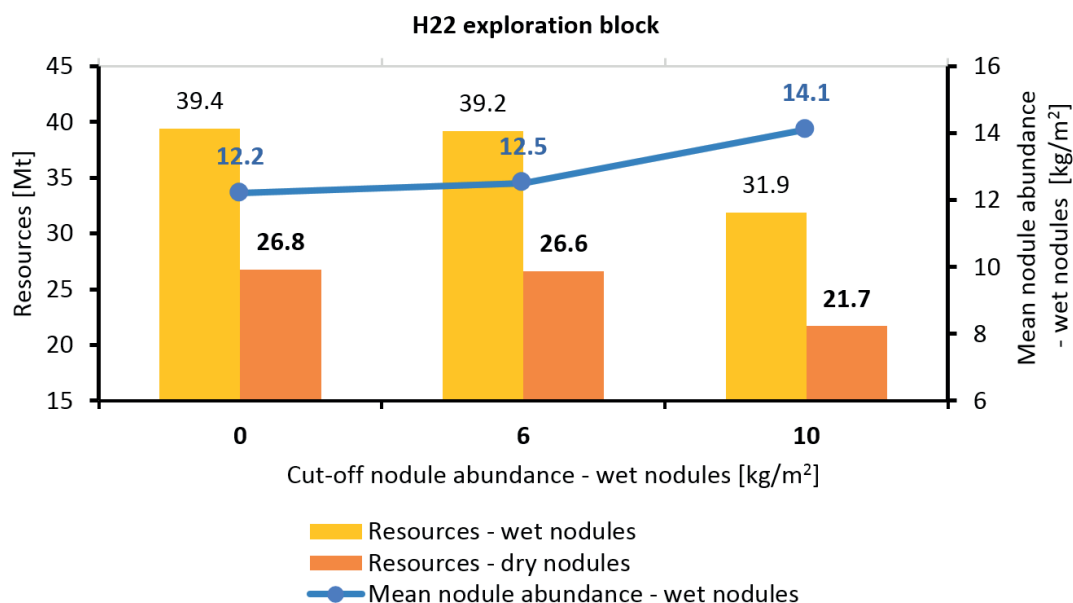


Fig. 16. Nodule Abundance – Tonnage graphs for H22 exploration block.

Resources classification

According to the CRIRSCO directives (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards), the resources of polymetallic nodules can be categorized as “inferred” in the B1 and B2 exploration areas and as “indicated” in the H11 and H22 exploration blocks. Such categorization is justified by different mean sampling intervals within exploration areas and exploration blocks. In the B1 and B2 exploration areas, the mean sampling intervals are 11 and 15 km, respectively. On the contrary,

in the H11 and H22 exploration blocks, the mean sampling interval is about 7 km each (Szamałek et al., 2016).

Mineral resource estimate for the IOM exploration area is presented in Tab. 16. The mineral resource estimate at an abundance cut-off of 10 kg/m² (wet conditions) is the selected base case scenario considering mining operation. The effective date for the estimate is June 2016. No mineral reserves were estimated at this stage of the project development.

At the current stage of geological prospection, the main factors controlling the accuracy of resource estimates

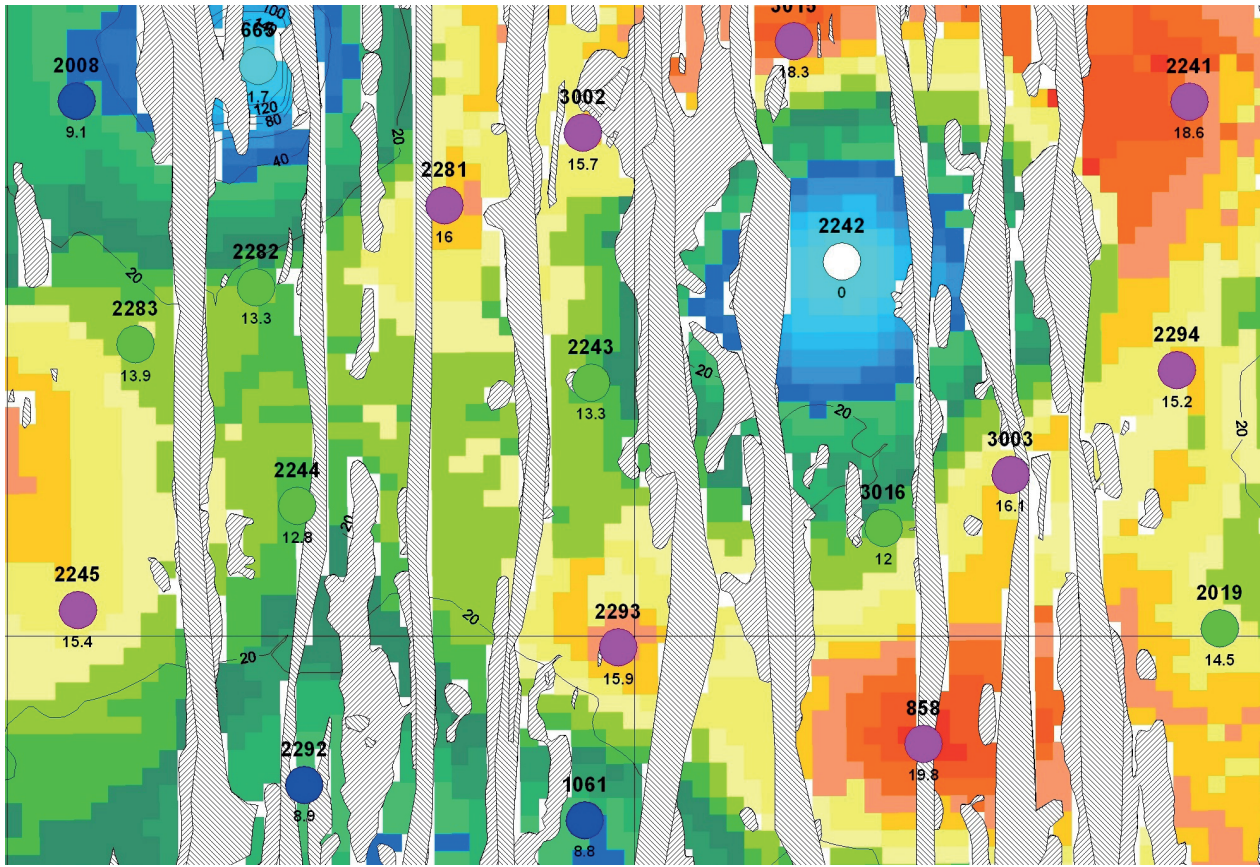


Fig. 17. Section from the nodule abundance map in H11 exploration block. Circular marks represent sampling points using box-corer, particular calculation blocks with 500 x 500 m dimensions are color-coded: cold colors represent low abundances, warm colors high abundances. Blue shades 0–8 kg/m², green 8–14 kg/m², yellow and red 14–22 kg/m². Hatched areas represent areas excluded from the resources estimation: areas with a slope above 7° and nodule free (Mucha et al., 2011).

Tab. 16

Estimation and classification of resources in the IOM exploration area (cut-off value of wet nodules abundance = 10 kg/m²) (Szamalek et al., 2016).

Resource category (according to CRIRSCO standards)	Abundance, wet conditions [kg/m ²]	Mn [%]	Ni [%]	Cu [%]	Co [%]	Resources, wet condition [mil. t]
Measured	–	–	–	–	–	–
Measured total						–
Indicated (H11 block)	14.6	31.74	1.31	1.29	0.16	41.4
Indicated (H22 block)	14.1	31.04	1.30	1.29	0.17	31.9
Indicated total						73.3
Inferred (B1 sector)	13.4	27.84	1.21	0.90	0.21	62.6
Inferred (B2 sector)	13.1	31.53	1.32	1.24	0.18	242.9
Inferred total						305.5

of polymetallic nodules are (Szamalek et al., 2016):

- high variability of nodule abundances (coefficient of variation $v = 60\%$),
- high contribution of random component in the total variability of nodule abundances observed,
- high mean sampling intervals, which are: about 11 km in the B1 area, about 15 km in the B2 area and about 7 km in both the H11 and H22 block.

At the scales of all exploration blocks, the accuracy of resource estimates of polymetallic nodules can be accepted as satisfactory (standard error of about 5 %). At the scale of smaller areas and a mean abundance of wet nodules of about 12 kg/m², the expected standard error can be around 10 %. However, for blocks with an area of about 1 km², the standard error of the estimate may be significant (over 20 %). For this reason,

in the period of the contract extension after 2016, it was planned to concentrate the sampling points density in the block H22_NE, which was selected for a detailed survey.

The improvement of accuracy of resource estimates, which is particularly important for small fragments of ore bodies, can be expected if:

- more advanced geostatistical methods are applied,
- wider applications of modern photo profiling methods are implemented, which would evaluate nodule abundances based upon images of the sea bottom.

The accuracy of Cu, Co, Mn and Ni grade estimates is highly satisfying in areas of any size due to low variability of metal contents resulted from stable chemical composition of polymetallic nodules. For the future re-categorization of nodule resources into nodule reserves, it is necessary to determine the relationships between the amounts of resources at various cut-off abundances as well as between the mean and the cut-off abundances at various sizes of mining blocks (e.g. areas corresponding to monthly, quarterly or annual production levels).

Conclusions

IOM holds licence over a polymetallic nodule deposit in the CCZ under a contract for exploration of polymetallic nodules signed with the International Seabed Authority. Legal framework for mining and environmental regulations, as a fundamental condition for future deep sea mining activities, is under the development by the ISA.

IOM has sufficient samples of adequate quality and authenticity to define Inferred and Indicated Mineral Resources. The effective date for the estimate is June 2016. Metals of value are manganese, nickel, cobalt, copper and zinc. Other metals of potential value (Mo, Fe, Li, REE) have not been estimated, but in the future, based on processing technology development, could provide added value to the project. Long-term geological survey and exploration confirmed that deposit is widespread and consistent in case of grades – nodule abundance varies more than metal grades. The accuracy of Cu, Co, Mn and Ni grade estimates is highly satisfying in areas of any size, due to low variability of metal contents resulted from stable chemical composition of polymetallic nodules. Mineral Resources were estimated at various nodule abundance cut-offs. Selected base scenario is an abundance cut-off of 10 kg/m² (in wet condition).

Indicated Resources in exploration blocks H11 and H22 were selected for the planned preliminary economic assessment. Due to the low degree of verification, Inferred Resources, estimated in the remaining area of sectors B1 and B2, will not be included in the economic assessment. Future activities of IOM will focus on a detailed survey of selected blocks and increasing the category of resources/

reserves. Geological data, together with other data obtained during the technological research of mining and processing methods, as well as environmental research, form the basis for the commercial model of deposit utilization in the form of a (pre)feasibility study.

Acknowledgement

Author expresses his thanks to IOM General Director Tomasz Abramowski and IOM experts Ivo Dreiseitl and Jozef Franzen for providing data and consultations. Besides these experts the work of Igor Modlitba in the field of engineering geology is worth to mention. Author is grateful to Dušan Kúšik and Pavel Bačo (State Geological Institute of Dionýz Štúr, Slovakia) for reviewing the primary manuscript.

References

- ABRAMOWSKI, T. & KOTLIŃSKI, R., 2011: Współczesne wyzwania eksploatacji oceanicznych kopalin polimetalicznych. *Gór. Geoinż. (Kraków)*, 4, 1, 41–62.
- AMANN, H., 1992: The environmental impact of deep-sea mining. Action 1. Polymetallic nodules and their environment. *Research analysis for BGR by THETIS Technology GmbH, Hannover*, 19–234.
- ANDREEV, S. I., 1994: Металлогения железомарганцевых образований Тихого океана. *ВНИИ Океанологии, Недра, St.-Peterburg*, 40–190.
- ANIKEEVA, L. L., ANDREEV, S. L., KAZMIN, YU. B., KORSKOV, O. D., EGIAZAROV, B. KH., LYGINA, T. I. & MIRCHINK, I. M., 1984: Morphology of manganese nodules. In: *Manganese nodules of the World Ocean. Moscow, Nedra*, 62–104.
- BEIERSDORF, H., VON STACKELBERG, U. & WIEDICKE-HAMBACH, M., 2003: Scientific challenges related to the development of a geological model for the manganese nodule occurrences in the Clarion-Clipperton zone (Equatorial North Pacific Ocean). In: *Establishment of a geological model of polymetallic deposits in the Clarion-Clipperton Fracture Zone of the equatorial North Pacific Ocean. Proc. Int. Seabed Authority's Workshop held 13–20 May, 2003 in Nadi, Fiji International Seabed Authority (ISA), Kingston*, 175–200.
- BURNS, R. G. & BURNS, V. M., 1977: Mineralogy of manganese nodules. In: *Glasby, G. P. (Ed.): Marine Manganese Deposits. N. Y., Amsterdam, Elsevier*, 15, 185–248.
- COUFAL, R. & DREISEITL, I., 2008: Koncepcja podziału dna oceanicznego w strefie wydobywczej Clarion-Clipperton w aspekcie właściwości geologiczno-inżynierskich. XVI seminarium naukowe z cyklu Regionalne problemy ochrony środowiska, Geotechnika w projektach regionalnych Unii Europejskiej na obszarze estuariowym, Szczecin – Praha, 25–33.
- CRONAN, D. S., 1977: Deep-sea nodules: Distribution and geochemistry. In: *Glasby, G. P. (Ed.): Marine Manganese Deposits. Amsterdam, Elsevier*, 15, 11–44.
- DREISEITL, I. & BEDNAREK, R., 2011: Physical properties of polymetallic nodules and deep sea sediments, as determined

- with different analytical techniques. *Proc. ISOPE – Ocean Mining Symposium, Maui, H.I., U.S.A.*
- DREISEITL, I. & KONDRATENKO, A., 2012: Geotechnical research in the exploration area of Interoceanmetal, Minerals of the Ocean – 6 & Deep Sea Minerals and Mining – 3, int. conf. *VNII Okeangeologia, Sankt Petersburg, Russia.*
- DREISEITL, I., 2011: The strength characteristics of deep seabed sediment. *Proc. Underwater Mining Institute conf., Hilo, H. I., U.S.A.*
- DREISEITL, I., 2012: Geotechnical properties of polymetallic nodules in the Interoceanmetal (IOM) exploration area. *Proc. Underwater Mining Institute conf., Tongji University, Shanghai, China.*
- Dreiseitl, I. & Kondratenko, A., 2013: Geoacoustic and photo-profiling as remote techniques of choice in nodule field exploration. In: *Proc. Underwater Mining Institute conf., Rio de Janeiro, Brazil.*
- FRANZEN, J. & BALÁŽ, P., 2012: Rare Earth Elements in the Polymetallic Nodules – a New Challenge. *Proc. 22th International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 17–22, 112–116.*
- HALBACH, P. & JAHN, A., 2016: Concentrations and metal potentials of REEs in marine polymetallic nodule and Co-rich crust deposits. Deep sea mining value chain: organization, technology and development. *West Pomerania Deep Sea Mining Conference, 18–19 January 2016, IOM, Szczecin, 119–131.*
- HALBACH, P., SCHERHAG, I. C., HEBISCH, U. & MARCHIG, V., 1981: Geochemical and Mineralogical Control of Different Genetic Types of Deep-Sea Nodules from the Pacific Ocean. *Miner. Depos., 16, 59–84.*
- HALBACH, P., GIOVANOLI, R. & VON BORSTEL, D., 1982: Geochemical processes controlling the relationship between Co, Mn and Fe in early diagenetic deep-sea nodules. *Earth Planet Sci. Lett., 60, 226–236.*
- HALBACH, P., FRIEDRICH, G. & VON STACKELBERG, U., 1988: The manganese nodule belt of the Pacific Ocean, Geological Environment Nodule Formation and Mining aspects. *Stuttgart, Enke, 7–254.*
- HALBACH, P., 1986: Cobalt-rich and platinum bearing manganese crusts – nature, occurrence and formation. In: Johnson, C. J. and Clark, A. L. (Eds.): Pacific mineral resources – physical, economic and legal issues. *Proc. of the Pacific Marine Mineral Resources Training Course, Honolulu, 137–160.*
- HAYNES, B. W., LAW, S. L., BARRON, S. C., KRAMER, G., W., MAEDA, R. & MAGYAR, M. J., 1985: Pacific Manganese Nodules: Characterization and Processing. *Bull. 679 /U.S. Dept. of the Interior Bureau of Mines, Bull, 1–43.*
- HEIN, J. R. & KOSCHINSKY, A., 2014: Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules. In: Holland, H. D. & Turekian, K. K. (Eds.): Geochemistry of Mineral Deposits. *Treatise Geochem., 13, Elsevier, Oxford, 273–291.*
- HEIN, J. R., MIZELL, K., KOSCHINSKY, A. & CONRAD, T. A., 2013: Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geol. Rev., 51, 1–14.*
- HEIN, J., 2012: Prospects for Rare Earth Elements from Marine Minerals. *ISA Briefing Paper 02/12.*
- ISA, 2010a: A Geological Model of Polymetallic Nodule Deposits in the Clarion Clipperton Fracture Zone. In: Morgan, Ch. (Ed.): A Geological Model of Polymetallic Nodule Deposits in the Clarion Clipperton Fracture Zone. *ISA Technical Study No. 6. International Seabed Authority, Kingston, Jamaica, 1–75.*
- ISA, 2010b: Prospector's Guide for Polymetallic Nodule Deposits in the Clarion Clipperton Fracture Zone. In: Morgan, Ch. (Ed.): A Geological Model of Polymetallic Nodule Deposits in the Clarion Clipperton Fracture Zone. *ISA Technical Study No. 6. International Seabed Authority, Kingston, Jamaica, 1–105.*
- ISAAKS, E. H. & SRIVASTAVA, R. M., 1989: An Introduction to Applied Geostatistics. *New York, Oxford University Press, 1–561.*
- JOURNAL, A. G. & HUIJBREGTS, Ch. J., 1978: Mining Geostatistics. *London, Academic Press, 1–600.*
- KOTLIŃSKI, R. A. & STOYANOVA, V., 2009: Relationship between nodule coverage, morphology and distribution in the Eastern Clarion-Clipperton Zone. Presentation from The workshop on the finalization of the Geological Model of the Clarion-Clipperton Fracture Zone (CCZ) is scheduled for 14–17 December 2009 at the Authority's headquarters in Kingston. <https://ran-s3.s3.amazonaws.com/isa.org.jm/s3fs-public/documents/EN/Workshops/2009/VStoyanova2.pdf>.
- KOTLIŃSKI, R. A. & TKATCHENKO, G., 1997: Preliminary results of IOM environmental research. In: Proc. int. symposium on environmental studies for deep-sea mining. *Tokyo, Metal Mining Agency Japan, 35–44.*
- KOTLIŃSKI, R. A., PARIZEK, A. & REZEK, K., 1997: Polymetallic nodules – a possible source of Rare Earth Elements. *Proc. 2nd ISOPE Ocean Mining Symposium, Seul, Korea 1997, 50–56.*
- Kotliński, R. A., 1999: Metallogenesis of the World's ocean against the background of oceanic crust evolution. *Spec. Pap., 4. Warszawa, Polish Geol. Inst., 1–59.*
- KOTLIŃSKI, R. A., 1998: Surowce metaliczne. In: Depowski, S., Kotliński, R., Rühle E. & Szamalek, K. (Eds.): Surowce mineralne mórz i oceanów. *Warszawa, Scholar, 125–184.*
- KOTLIŃSKI, R. A., 1999: Metallogenesis of the World's ocean against the background of oceanic crust evolution. *Spec. Pap., 4. Warszawa, Pol. Geol. Inst., 1–59.*
- KOTLIŃSKI, R. A., 2003: 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. *Int. Seabed Authority, Nadi, Fiji, 2003, 203–221.*
- KOTLIŃSKI, R. A., YUBKO, V. & STOYANOVA, V., 2009: Effects of the structural-tectonic and volcanic processes on formation of polymetallic nodules in the CCZ. Presentation from The workshop on the finalization of the Geological Model of the Clarion-Clipperton Fracture Zone (CCZ). Authority's headquarters in Kingston, Jamaica.
- KOTLIŃSKI, R. A., 2010: Sediments in the Eastern CCZ. Prospector's Guide for the Clarion-Clipperton Zone Polymetallic Nodule Deposits. In: Morgan, Ch. (Ed.): Development of a Geological Models for the Clarion-Clipperton Zone Polymetallic Nodule Deposits ISA. *Jamaica, 2, 5–16.*

- KOTLIŃSKI, R. A., 2011: Polymetallic Nodule Deposits in the Clarion Clipperton Fracture Zone – a source of raw materials in the future (in Polish). *Gór. Geoinż.*, 35, 4, 1, 195–214.
- MACKOVÝCH, D., LUČIVJANSKÝ, P. & PRAMUKA, S., 2015: Determination of matrix composition of polymetallic nodules on samples taken in the cruise iom-2014, including ree and noble elements. Final report. *Manuscript. Spišská Nová Ves, archive SGIDŠ*.
- MATHERON, G., 1963: Principles of Geostatistics. *Econ. Geol.*, 58, 1246 – 1266.
- MEYLAN, M. A., 1974: Field description and classification of manganese nodules. In: Andrews, J. E. et al.: Ferromanganese deposits of the ocean floor. *Cruise report Mn-74-01 R/V Moana Wawe, Hawaii, Inst. Geophys. Rep. HIG – 74-79, Honolulu*, 158–168.
- MORGAN, Ch., 2009: Geological Model Project Implementation. Presentation from The workshop on the finalization of the Geological Model of the Clarion-Clipperton Fracture Zone (CCZ) is scheduled for 14–17 December 2009 at the Authority's headquarters in Kingston. https://ran-s3.s3.amazonaws.com/isa.org.jm/s3fs-public/documents/EN/Workshops/2009/Implementation_CM.pdf.
- MORGAN, Ch., 2012: A Geological Model of Polymetallic Nodule Deposits in the Clarion Clipperton Fracture Zone. *ISA Briefing Paper 01/12*, 1–12.
- MORITANI, T., MARUYAMA, S., NOHARA, M., MATSUMOTO, K., OGITSU, T. & MORIWAKI, H., 1977: Description, classification and distribution of manganese nodules. *Geol. Surv. Jpn., Cruise Rep.*, 8, 136–158.
- MUCHA, J. & WASILEWSKA, M., 2007: Estimation of polymetallic nodule resources of the IOM's exploration area and its nickel, manganese and molybdenum contents using a geostatistical method for available geological data processing (in Russian). *Report, IOM, Szczecin*.
- MUCHA, J., WASILEWSKA-BŁASZCZYK, M. & YUBKO, V., 2011: Estimation of polymetallic nodule resources of and its nickel, manganese copper and cobalt contents using the geostatistical method of processing based on the IOM geological data. *Report, IOM, Szczecin*.
- MUCHA, J., WASILEWSKA-BŁASZCZYK, M. & WÓJTOWICZ, J., 2015: Evaluation of the resources of polymetallic nodules and contained metals in the H22 exploration block, and in ore deposits distinguished within the block. *Report, 1–31, IOM, Szczecin*.
- PIPER, D. & BLUEFORD, R., 1982: Distribution, mineralogy and texture of Manganese nodules and their relation to sedimentation at Domes Site A in the equatorial North Pacific. *Deep Sea Res.*, 29, 8a, 927–952.
- RÜHLEMANN, C., KUHN, T., WIEDICKE, M., KASTEN, S., MEWES, K. & PICARD, A., 2011: Current Status of Manganese Nodule Exploration in the German License Area. *Proc. 9th ISOPE Ocean Mining Symp., Maui, Hawaii, USA*.
- Sea-floor mining, 2014. In: Marine Resources – World Ocean Review 3. *Opportunities Risks*, 54–95. https://worldoceanreview.com/wp-content/downloads/wor3/WOR3_english.pdf.
- SHANOV, S., BOIKOVA, A. & RADULOV, A., 2007: Estimation of the resources of polymetallic nodules of the IOM exploration area and their content of copper, cobalt and zinc using a geostatistical method for processing the geological data available in IOM. *Report, IOM, Szczecin*, 1–48.
- STACKELBERG, VON U. & BEIERSDORF, H., 1991: The formation of manganese nodules between the Clarion and Clipperton fracture zones southeast of Hawaii. *Mar. Geol.*, 98, 411–423.
- SZAMALEK, K., DAMRAT, M., FRYDEL, J., KAULBARSH, D., KRAMARSKA, R., RELISKO-RYBAK, J., MUCHA, J. & WASILEWSKA-BŁASZCZYK, M., 2016: Technical Report on the Interoceanmetal Joint Organization polymetallic nodules project in the Pacific Ocean Clarion-Clipperton Fracture Zone. *Pol. Geol. Inst. – Nation. Res. Inst., AGH Univ. Sci. Technol., Internal IOM report*.
- USUI, A., NISHIMURA, A., TANAHASHI, M. & TERASHIMA, S., 1987: Local variability of manganese facies on small abyssal hills of the Central Pacific Basin. *Mar. Geol.*, 74, 237–275.
- YAMAMOTO, J. K., 2005: Correcting the smoothing effect of ordinary kriging estimates. *Mathem. Geol.*, 37, 1, 69–94.

Výsledky prvej fázy geologického prieskumu hlbokomorských polymetalických konkrécií v prieskumnom území Spoločnej organizácie Interoceanmetal (2001 – 2016)

Spoločná organizácia Interoceanmetal (IOM) vykonáva geologický prieskum v prieskumnom území v oblasti zlomového pásma Clarion-Clipperton (CCZ) vo východnej časti Tichého oceánu. Činnosti súvisiace s prieskumom a využívaním nerastného bohatstva morského dna v medzinárodných vodách (za hranicami národnej jurisdikcie štátov) je pod administratívnym dozorom Medzinárodnej organizácie pre morské dno (MOMD), ktorá bola zriadená na kontrolu dodržiavania *Dohovoru OSN o morskom práve* (1982) a *Dohody o uplatňovaní časti XI* uvedeného dohovoru (1994). Organizácia MOMD má v súčasnosti 168 členských štátov vrátane Slovenska a Európskej únie ako celku.

MOMD vydáva záväzné právne dokumenty, ktorými reguluje vykonávanie prieskumu a budúceho využívania morského dna. Zmluva s MOMD poskytuje exkluzívne právo na prieskum územia a uzatvára sa na obdobie 15 rokov s možnosťou predĺženia o ďalšie 5-ročné obdobia. Vykonávateľ prác je povinný predkladať MOMD ročné správy o činnosti. IOM zavŕšil činnosti spojené s 15-ročnou zmluvou v roku 2016, v súčasnosti je kontrakt predĺžený do roku 2021.

Prieskumné územie organizácie Interoceanmetal je spoločné pre všetkých 6 členských krajín: Bulharsko, Kuba, Česká republika, Poľsko, Ruská federácia a Slovensko. Deliť sa bude len prípadný zisk alebo krajina bude

môcť predať svoj podiel v spoločnom podniku. Preto sa plánuje transformácia IOM z prieskumnej organizácie na formu akciovej spoločnosti.

Okrem geologického prieskumu IOM pracuje na výskume technológie dobývania a úpravy hlbokomorských polymetalických konkrécií (PMK), ako aj na environmentálnom výskume.

Lokalita

V rámci pásma Clarion-Clipperton (CCZ) vo východnej časti Tichého oceánu sa prieskumné práva IOM vzťahujú na územie s rozlohou 75 000 km² (obr. 1). Prieskumné územie sa v roku 2016 skladalo z dvoch sektorov (B1 a B2) a v rámci sektora B2 boli vyčlenené dva prieskumné bloky, H11 a H22 (tab. 1, obr. 2).

Metodika prieskumu

Z viacerých metód zameraných na prieskum a vzorkovanie polymetalických konkrécií morského dna boli počas expedícií IOM využité nasledujúce dištančné metódy:

Batymetria

Batymetria slúži na meranie hĺbky a mapovanie morfológie dna s využitím multilúčového sonaru (*multibeam bathymetry*) a zároveň poskytuje informácie o charaktere morského dna na základe intenzity odrazeného signálu (*backscatter*). Zariadenie je inštalované na prieskumnom plavidle.

Geoakustické profilovanie

Geoakustické profilovanie sonarom bočného skenovania (*side-scan sonar*) slúži na detailné mapovanie profilu dna v šírke zhruba 2 km a získanie akustického profilu dna do hĺbky okolo 100 m (obr. 3). Pomáha identifikovať oblasti pokrytia konkréciami, druhy sedimentov, ako aj reliéf dna a potenciálne prekážky, ktoré môžu limitovať budúcu ťažbu. Zariadenie je vlečené za prieskumným plavidlom 80 až 120 m nad morským dnom.

Fotoprofilovanie

Foto- a videoprofilovanie (obr. 4, obr. 5) poskytuje informácie na analýzu pokrytia dna konkréciami (jednotlivé snímky dna) a identifikáciu zón s výskytom PMK, ako aj identifikáciu prekážok pre potenciálnu ťažbu (súvislé videozáznamy). Zariadenie je vlečené za prieskumným plavidlom asi 4 m nad morským dnom, jednotlivé snímky pokrývajú zhruba 5 m² morského dna.

Kontaktné metódy predstavujú odber vzoriek konkrécií a sedimentov morského dna:

- vzorkovanie PMK a sedimentov pomocou zariadenia *box-corer*, ktorým sa získava vzorka s rozmermi 0,5 x 0,5 x 0,5 m,
- vzorkovanie sedimentov pomocou zariadenia *gravity-corer*, ktorým sa získava jadrová vzorka sedimentu do hĺbky 4 m,

- odoberanie veľkokapacitných vzoriek PMK *vlečnou sieťou*, jedným odberom je možné získať do 1 000 kg suroviny.

Laboratórne chemické analýzy a geotechnické merania sa robili štandardnými metódami. Základné analýzy a merania vyžadujúce okamžité spracovanie vzoriek sa vykonávali na palube prieskumného plavidla počas trvania expedície.

Geotechnické merania

Geotechnické merania fyzikálnych a mechanických vlastností sedimentov (napr. obsah vody, objemová hmotnosť, odpor odtrhnutia konkrécie zo sedimentu, pevnosť v šmyku, penetračný odpor, mechanická pevnosť) a polymetalických konkrécií (vlhkosť, objemová hmotnosť) sa vykonávali v palubných laboratóriách prieskumného plavidla. Merania sedimentov sa robili na neporušených vzorkách priamo vo vzorkovacom zariadení (*box-corer*) vyrezávaním reznými prstencami v geochemicky aktívnej vrstve (priemer jadrovej vzorky 50 mm, výška 25 mm) a v podložných sedimentoch (priemer 70 mm a výška 50 mm). V závislosti od množstva sedimentu vo vzorkovnici sa testovali hĺbkové intervaly 2 – 5, 10 – 15, resp. 25 – 30 cm. Vzorky PMK určené na analýzu sa vyberali z prevládajúcich morfológických typov a frakcií. Stanovenie parametrov fyzikálnych vlastností konkrécií sa uskutočnilo v súlade s *Metodickými odporúčaniami pre štúdium fyzikálno-mechanických vlastností kobaltovo-mangánových kôr svetového oceánu* (Andreev, 1994).

Laboratórne analýzy

Analýzy sa vykonávali v palubných a pozemných laboratóriách. Obsah kovu v odobratých vzorkách bol stanovený rôznymi metódami vrátane atómovej absorpčnej spektroskopie a röntgenovej fluorescencie. Štandardné metódy a zariadenia boli použité na určenie obsahu pórovej vody v sedimente (centrifúga, polykarbonátové filtračné zariadenie s vákuovou pumpou), hodnoty pH a Eh (elektrody, kalibrovaný pH-meter/ionometer), obsahu opálu SiO_{2am} (spektrofotometria), obsahu kovov v sedimente (atómová absorpčná spektroskopia), obsahu As (inverzná voltamperometria), obsahu kalcitu a dolomitu, organického uhlíka, koncentrácie dusitanov, dusičnanov, fosfátov a kremičitanov v pórovej vode (špeciálne laboratórne merania a spektrofotometria) a obsahu kovov v pórovej vode (inverzná voltamperometria). Všetky merania boli vykonané s použitím certifikovaných metodík a štandardných noriem.

Geotechnické merania sedimentov a konkrécií zahŕňali určenie objemovej hustoty, obsahu vody, hmotnosti sušiny, pórovitosti, čísla pórovitosti a špecifickej hustoty (s použitím píknometrickej metódy).

Výsledky

Prezentované výsledky zahŕňajú údaje relevantné na odhad zásob a zdrojov v skúmanej oblasti, plánovanie

potenciálnej ťažby a úpravy suroviny, ako aj hodnotenie dosahov na životné prostredie.

Prehľad vykonaných expedícií 2001 – 2016

Pred podpisom zmluvy o prieskume medzi MOMD a IOM v roku 2001 sa uskutočnilo 21 vedeckovýskumných expedícií do oblasti CCZ. V prvej fáze kontraktu (2001 – 2016) sa realizovali 4 expedície. Práce sa vykonávali v súlade s programami činností na päťročné obdobia, schválenými MOMD. Práce zahŕňali geologický prieskum zameraný na hustotu uloženia PMK, pokrytie plochy dna konkréciami, určenie obsahu kovov a chemického zloženia PMK a sedimentov morského dna, štúdium ich geotechnických vlastností, ako aj zber základných oceánografických a meteorologických údajov a údajov o životnom prostredí.

Výsledky prieskumu sa sumarizovali po jednotlivých expedíciách v správach o komplexnom geologicko-environmentálnom výskume, v polročných správach na zasadania Rady IOM a v ročných správach pre MOMD. Prehľad a výsledky doterajších prieskumných prác boli zhrnuté v technickej správe (Szamalek et al., 2016).

Topografia morského dna

Ešte pred začiatkom 15-ročného zmluvného obdobia (1999) IOM vykonal batymetrické mapovanie celého prieskumného územia (sektory B1 a B2). Výsledkom meraní je batymetrická mapa morského dna zostavená v mierke 1 : 200 000 s izobatovými intervalmi 25 m.

Litológia a stratigrafia

Skúmané územie je tvorené vulkanickým podložím (bazalty) a prevažne ílovito-kremičito-vápenatými sedimentmi. Morské sedimenty v oblasti CCZ reprezentuje zmes karbonátov (hlbokomorské karbonátové kaly – bahná), červenohnedých ílov a kremičitých sedimentov (kremičité hlieny a kremičito-ílovité bahná). Litofácie vykazujú jednosmerný gradientový trend zmeny od prevládajúcich karbonátových sedimentov na jv. okraji zóny až po prevládajúce červenohnedé íly a kremičité sedimenty na zsz. okraji zóny (Kotlínski a Stoyanova, 2009). Sedimentárne pokrytie sa vyznačuje postupným poklesom veku sedimentov od neskorej kriedy po kvartér a postupným znižovaním ich hrúbky smerom na východ od zhruba 300 do 100 m (Kotlínski, 2011). Rýchlosť sedimentácie v oblasti neprekračuje 10 mm/1 000 rokov. Podiel kremičito-ílových zložiek sedimentov sa zvyšuje od miocénu, zmeny litodynamických podmienok však spôsobujú pravidelnú aktiváciu erózných procesov na morskom dne (ISA, 2010b).

Sedimenty morského dna v prieskumnej oblasti IOM možno na základe genézy a zloženia rozdeliť na štyri litostratigrafické jednotky (Kotlínski, 2010):

- $F_{M I}$ (oligocén – miocén) – najnižšia litofácia pozostávajúca z biogénneho vápnitého bahna, hrúbka je asi 0,7 m, obsah amorfného oxidu kremičitého je 1,36 – 7,75 %;
- $F_{M II}$ (miocén) – litofácia reprezentovaná amorfnou rádioláriovou kremičitou hlinkou, sedi-

menty sú biogénne, pelagické a detritické, čiastočne sú produktom halmyrolýzy a erózie bazaltov, hrúbka je asi 2,6 m, obsah amorfného oxidu kremičitého je 0,9 – 16,3 %;

- $F_{Cl III}$ (miocén – pliocén) – litofácia zahŕňa zeolitovú hlinku alebo červenohnedú hlinku a hustejšie zeolitové kôry, celková hrúbka je 4 m, z toho hrúbka zeolitovej vrstvy zhruba 2,7 m, obsah amorfného oxidu kremičitého je 0,48 – 8,8 %;
- $F_{Cl IV}$ (pleistocén – holocén) – litofácia pozostáva z kremičitého hlinitého ílu, diatomového ílu a vápenatého kremičitého ílu, jeho horná vrstva s hrúbkou zhruba 0,4 m do hĺbky prechádza do svetlejšieho sedimentu, ktorý je biogénneho a detritického pôvodu, celková hrúbka je viac ako 5 m.

Predpokladá sa, že litostratigrafické jednotky $F_{M I}$ a $F_{M II}$ predstavujú formáciu Marqueasas (oligocén a miocén), sedimenty litofácií $F_{Cl III}$ a $F_{Cl IV}$ predstavujú formáciu Clipperton (pliocén – holocén). Maximálna hrúbka príslušných litostratigrafických jednotiek zistená vzorkovacím zariadením a vybrané chemicko-fyzikálne vlastnosti sedimentov dna v prieskumnom území IOM sú uvedené v tab. 2. Sedimentárna pokrývka v prieskumnej oblasti IOM dosahuje hrúbku okolo 100 m (Dreiseitl a Kondratenko, 2012). Najvyššiu vrstvu sedimentárneho profilu, ktorá je geochemicky aktívnym prostredím na tvorbu polymetallických konkrécií, predstavuje jemný kremičito-silikátový íl s hrúbkou 1 – 15 cm. Sedimenty tejto vrstvy obsahujú 3,0 – 28,6 % amorfného oxidu kremičitého, vyznačujú sa zníženou objemovou hmotnosťou a zvýšenou vlhkosťou.

Akustické profily morského dna (do hĺbky okolo 100 m) poskytujú údaje na identifikáciu geoakustických komplexov. Interpretácia seizmických akustických profilov viedla k rozlíšeniu nasledujúcich geoakustických jednotiek vo východnej časti CCZ (Kotlínski a Tkatchenko, 1997):

- A – horná akusticky priehľadná vrstva (sedimentárna jednotka kvartérneho až neskoromiocénneho veku),
- B – horná stratifikovaná (akusticky polopriehľadná) vrstva (sedimentárna jednotka od neskorého miocénu do skorého miocénneho veku),
- C – dolná akusticky transparentná vrstva (sedimentárna jednotka skorého miocénneho veku),
- F – skalné podložie (tholeiitický čadič).

Geoakustické komplexy A, B, C a F identifikované na základe údajov sonaru (obr. 6) zodpovedajú uvedeným seizmickým akustickým jednotkám. Hrúbka komplexu A dosahuje 10 až 20 m, čo súvisí s rozmanitosťou topografie dna oceánu, ako aj hlbkomorskými prúdmi ovplyvňujúcimi procesy erózie.

Interpretácia ôsmich staníc odberu vzorky pomocou zariadenia *gravity-corer* (expedícia IOM-2001) vo forme profilu je znázornená na obr. 7. Siedma vzorkovnica narazila na odkryv bazaltu (bez odberu vzorky).

Charakteristika sedimentov

Chemické a fyzikálne vlastnosti sedimentov majú rozhodujúci význam pri výbere optimálnej metódy budúcej

ťažby (technológia zberu konkrécií a pohybu kolektora po morskom dne) s ohľadom na environmentálne monitorovanie a ochranu morského prostredia. Výsledky meraní fyzikálnych vlastností sú prezentované v tab. 3. Atterbergove limity (kritický obsah vody v jemnozrnnnej pôde) pre rôzne typy sedimentov v prieskumnej oblasti IOM (okrem kôry, ktorú nie je možné týmto spôsobom testovať) sú uvedené v tab. 4. Výsledky potvrdzujú vysoko plastickú a kvapalnú konzistenciu analyzovaných hlbokomorských sedimentov.

Mechanické (pevnostné) vlastnosti sedimentov, ktorých charakteristiky je nevyhnutné poznať pri plánovaní budúcej banskej činnosti, sú uvedené v tab. 5 a 6. Odhaduje sa, že rozdiel medzi hodnotami parametrov pevnosti sedimentu určenými v palubnom laboratóriu a *in situ* je približne 28 – 32 % (Dreiseitl, 2011), pretože hlbokomorské sedimenty strácajú svoje vlastnosti po vyzdvihnutí na palubu v akomkoľvek type vzorkovacieho zariadenia.

Fyzikálne a mechanické parametre kremičitých sedimentov vo vrchných vrstvách hlbokomorských sedimentov závisia od obsahu opálu ($\text{SiO}_{2\text{am}}$) v sedimente. Hodnoty objemovej hustoty, ako aj pevnosť v šmyku sú nepriamo úmerné obsahu $\text{SiO}_{2\text{am}}$ v sedimente.

Redoxný potenciál (E_h) sedimentov v prieskumných blokoch bol stanovený na palube plavidla pomocou platinových elektród. Analýzy ukazujú, že nízke hodnoty E_h (< 450 mV) geochemicky aktívnej vrstvy majú za následok neprítomnosť konkrécií v dôsledku redukcie Mn^{4+} , ktorý prechádza do pórovej vody a zostáva rozpustený vo vrstve sedimentu. Naproti tomu, zistil sa vysoký výskyt konkrécií tam, kde E_h dosahoval vysoké hodnoty (> 500 mV).

Hodnoty pH v sedimentoch prieskumného bloku H22 namerané počas expedície v roku 2014 sa pohybovali od slabo alkalických (7,5 – 7,8) po neutrálne (7,1 – 7,5), čo zodpovedá hodnotám pH vo vrstvách sedimentu v prieskumnom bloku H11 nameraným v roku 2009 (Kotliński, 2010) v rozsahu od slabo alkalických (7,6) po neutrálne (pH 7,14). Vo všeobecnosti vrchné vrstvy sedimentu vykazujú relatívne zvýšené hodnoty pH.

Polymetalické konkrécie

Všeobecný model tvorby konkrécií

Polymetalické konkrécie v skúmanom území vystupujú na oceánskom dne a spravidla ležia v polotekutej povrchovej vrstve. Pomerne často sú pokryté tenkou vrstvou nekonsolidovaných sedimentov. Konkrécie tvoria jadro, na ktorom narastajú koncentrické vrstvy hydroxidov a oxidov železa a mangánu. Okrem Mn a Fe sú hlavnými kovovými prvkami v konkréciách aj Cu, Ni a Co. Výskyt vysokej koncentrácie konkrécií v oblasti CCZ je výsledkom komplexných procesov pôsobiach na regionálnej a lokálnej úrovni.

Na základe spôsobu formovania možno kovy obsiahnuté v konkréciách rozdeliť na tri skupiny:

- železo sa vyskytuje vo vodách oceánu vo forme koloidných častíc oxyhydroxidov železa, zdrojom je rozpúšťanie vápenatých schránok pod zónou CCD (ISA, 2010a),
- kobalt sa akumuluje vplyvom hydrogénnych procesov (Halbach, 1986),

- mangán, nikel a meď sú závislé od biogeochemického cyklu, všeobecne akceptovaný model (ISA 2010a) rozdeľuje proces akumulácie mangánu, niklu a medi na 4 fázy: 1. prvá fáza zahŕňa transport kovov do oceánu zo súše (zvetrávanie), z vulkanogénneho oceánskeho hrebeňa East Pacific Rise (EPR) a z atmosférických zdrojov. Kovy sú na povrchu jemných častíc sedimentov transportované v suspenzii oceánskymi prúdmi; 2. častice konzumuje zooplanktón a kovy sú koncentrované vo fekálnych mikropelletách (najmä Mn) a v schránkach odumretého planktónu klesajú na morské dno; 3. pelety sú biologicky prepracované benthickou faunou a degradované bakteriálnymi metabolickými procesmi. Následkom toho sa uvoľňujú rozpustné kationy kovov – počas prvej diagenézy sa pórová voda vo vrchnej vrstve polotekutého sedimentu stáva suboxickou, zintenzívňuje proces a lúhuje kovy. Vďaka tomu je silne obohatená o ióny kovov; 4. posledná fáza zahŕňa tvorbu konkrécií, keď sa v najvrchnejšej vrstve vytvárajú mangánové minerály (todorokit, birnessit), ktorých intersticiálne vrstvy dokážu zachytávať kovy ako meď a nikel (Morgan, 2012).

Proces tvorby konkrécií v oblasti CCZ ovplyvňuje šesť hlavných faktorov (ISA, 2010b):

- a) zdroj (dostupnosť) kovov – vo všeobecnosti dostupnosť kovov z morskej vody a sedimentov dna nie je obmedzená;
- b) nevyhnutná prítomnosť jadra – jadrá konkrécií predstavujú fragmenty starých konkrécií, spevnených sedimentov, vulkanoklastických hornín, schránok živočíchov, zubov rýb a pod. (v podstate všetky materiály, ktoré sú o niečo tvrdšie ako sediment morského dna, môžu slúžiť ako jadrá na tvorbu konkrécií);
- c) antarktická spodná voda (AABW) – tento prúd, resp. vodná masa sa považuje za zdroj kyslíka a materiálov, z ktorých sa formovali jadrá konkrécií, najmä počas stredného až neskorého miocénu;
- d) polotekutá povrchová vrstva – vrstva na povrchu dna, ktorá má rozhodujúci význam pri tvorbe konkrécií, poskytujúca stavebné prvky a chemické prostredie na ich rast;
- e) bioturbácia – mechanizmus, ktorý zabráňuje rýchlemu prekrytiu konkrécií sedimentmi morského dna;
- f) interná stratigrafia konkrécií – výsledok meniacich sa podmienok v geologickej histórii hlbokomorských bazénov.

Poloha vznikajúcej konkrécie v rámci polotekutej povrchovej vrstvy dna je rozhodujúcim faktorom pri zásobovaní kovovými iónmi. V závislosti od polohy konkrécie počas jej rastu sa rozlišujú tri typy konkrécií:

- v polotekutej povrchovej vrstve – diagenetický typ D, nazývaný aj typ R (*rough*) kvôli charakteristickému drsnému povrchu konkrécií;
- na rozhraní morskej vody a polotekutej povrchovej vrstvy – zmiešaný typ hydrogenetických a diagenetických procesov (typ HD), nazývaný aj typ R + S (*rough-smooth*) kvôli zmiešanej morfológii ich povrchu;

- nad morským dnom na povrchových sedimentoch dna – hydrogenetický typ H, nazývaný aj typ S (*smooth*) kvôli charakteristickému hladkému povrchu konkrécií.

Proces rastu konkrécií je ovplyvnený vzdialenosťou od vulkanogénnych zdrojov kovov (Hein et al., 2013). V blízkosti Východopacifického chrbta (*East Pacific Ridge* – *EPR*) je najpravdepodobnejšia tvorba hydrogenetického typu konkrécií, s rastúcou vzdialenosťou sa jeho podiel znižuje a postupne ho nahrádzajú konkrécie tvorené diagenetickými procesmi.

Rýchlosť rastu polymetalických konkrécií v oblasti CCZ predstavuje 1 až 10 mm za 1 milión rokov (Beiersdorf et al., 2003). Priemerná rýchlosť rastu konkrécií typu H je približne 1 mm za 1 milión rokov, zatiaľ čo konkrécie typu D rastú rýchlosťou približne 5 až 15 mm za 1 milión rokov (Amann, 1992; Kotlínski, 1998). Niektorí autori uvádzajú, že konkrécie typu D môžu rásť až 100 mm za 1 milión rokov (Sea-floor mining, 2014). Malá rýchlosť rastu naznačuje, že konkrécie vyžadujú stabilné podmienky prostredia po dlhý čas, aby dosiahli niekoľkokentimetrovú veľkosť. Aj keď sa akumulácia sedimentov v tejto oblasti považuje za nízku (niekoľko milimetrov za tisíc rokov), je o tri rády vyššia ako rast konkrécií.

Mineralogické zloženie

Minerálne zloženie polymetalických konkrécií pozostáva z kryštalických minerálnych fáz (najmä oxidov mangánu) a amorfných minerálnych fáz (hlavne hydratovaných oxidov železa) v rôznych pomeroch v závislosti od hydrogenetických alebo diagenetických procesov tvorby konkrécií.

Hlavnými minerálmi mangánu sú (Burns a Burns, 1977; Usui et al., 1987; Halbach et al., 1988; Kotlínski, 1998; 2003):

- todorokit (10 Å manganit, busserit), ktorý sa pravdepodobne tvorí z rozpusteného mangánu v pórových vodách počas diagenézy,
- birnessit (7 Å manganit),
- vernadit (δ -MnO₂, birnessit s nepravidelnou štruktúrou), slabo kryštalizovaný hydrogenetický oxid Fe-Mn.

Hlavným minerálom železa je amorfný oxyhydroxid železa δ -FeO (OH), ktorý môže zahŕňať goethit, ferroxyhit, lepidokrokrit, akageneit, hematit alebo ferrihydrit (Kotlínski, 1999; Hein a Koschinsky, 2014). V konkréciách sa okrem toho nachádzajú mikroskopické detritické kremičitany, živce, plagioklasy, kremeň a phillipsit (Kotlínski, 1998). Ako akcesorické minerály sa vyskytujú aragonit, apatit, amorfný oxid kremičitý (opál), pyroxény, amfiboly, barit, spinely, rutil, anatas a ílové minerály (chloritany, illit, montmorillonit) (Cronan, 1977; Piper a Blueford, 1982; Halbach et al., 1982; Andreev, 1994; Kotlínski, 1998). Ílové minerály a zeolity sa väčšinou vyskytujú v jadrách konkrécií, niekedy ako rozptýlené zhluky. Obsah SiO₂ a Al₂O₃ v konkréciách zvyčajne dosahuje 25 až 30 %. Zriedkavo sa objavujú kalcitové bioklasty (napr. *Foraminifera*) vyplnené apatitom (Kotlínski, 1998).

Chemické zloženie

Konkrécie z oblasti CCZ sa vyznačujú vysokým plošným výskytom (hustotou uloženia udávanou v kg/m²) a obsahom kovov (hlavne Mn, Ni, Cu, Co, Mo, Zn a vzácnych zemín) v porovnaní s ostatnými oceánskymi konkrécionosnými oblasťami (Kotlínski, 1998; Kotlínski, 2011). Obsah prvkov v konkréciách závisí od podielu hydrogenetických alebo diagenetických procesov na tvorbe konkrécií. Konkrécie, v ktorých prevláda todorokit, sú zvyčajne bohaté na Mn, Ni, Cu a Zn, zatiaľ čo konkrécie, v ktorých prevláda vernadit, sú bohaté na Fe, Co a Pb. Priemerné hodnoty obsahu hlavných kovov sa v rámci prieskumného územia IOM pohybujú v tomto rozmedzí: Mn 27,64 – 31,55 %, Ni 1,22 – 1,30 %, Cu 0,93 – 1,30 % a Co 0,16 – 0,20 %.

S rastúcou hĺbkou výskytu konkrécií (generálne v severo-južnom smere) sa zvyšuje obsah Mn a Cu, zatiaľ čo obsah Ni a Co klesá. Vyšší obsah Co je charakteristický pre genetické typy H a D v severnej časti oblasti. Zvýšený obsah Mn, Cu a Ni bol zaznamenaný v konkréciách genotypu D v centrálnej časti oblasti, v južnom smere možno pozorovať aj nárast obsahu Mn (Abramowski a Kotlínski, 2011). Železo spolu s mangánom tvoria hlavnú zložku polymetalických konkrécií. Priemerný obsah Fe v konkréciách v oblasti CCZ je takmer 6 %.

Výsledky komplexnej chemickej analýzy spoločnej vzorky (10 kg) odobratej vlečnou sieťou v prieskumnom bloku H22 sú uvedené v tab. 7. Na stanovenie Ni, Cu a oxidov sa použila röntgenová spektrometria, AES-ICP sa použil na stanovenie Co a prvkov vzácnych zemín (tab. 8), gravimetria sa použila na stanovenie celkovej síry a straty žíhaním. Obsah drahých kovov Pt, Pd, Au a Ag bol nižší ako detekčný limit použitých analytických metód (AAS-F, ETA-AAS, ICP-MS).

V CCZ konkrécie obsahujú aj ďalšie kovy s potenciálnym ekonomickým významom, ako sú Mo, Zn, V, Zr, Li a REE, ktoré môžu byť vedľajšími produktmi ťažby (Hein, 2012; Hein a Koschinsky, 2014; Halbach a Jahn, 2016). Obsah Mo je v rozmedzí 0,048 – 0,058 %, Zn 0,124 – 0,168 %, V 0,045 %, Zr 0,036 – 0,077 % a Li 131 ppm (Hein et al., 2013). Obsah vzácnych zemín (REE) je vo všeobecnosti nižší ako na ložiskách na súši, ale v absolútnych číslach predstavuje omnoho väčšie minerálne zdroje. Navyše, zastúpenie ťažkých vzácnych zemín (HREE), ktoré majú väčší ekonomický význam ako ľahké vzácne zeminy (LREE), je v hlbokomorských ložiskách podstatne vyšší ako na ložiskách na súši (26 % z celkového obsahu REE v porovnaní s 1 % na súši) (Hein, 2012; Hein et al., 2013; Halbach a Jahn, 2016). Obsah REE súvisí s genetickým typom: hydrogenetické – najvyšší obsah, diagenetické – najnižší obsah (Kotlínski et al., 1997). Navyše, hlbokomorské ložiská nie sú kontaminované rádioaktívnymi prvkami ako Th a U. Vybrané hodnoty obsahu REE v konkréciách z prieskumného územia IOM sú prezentované v tab. 8.

Klasifikácia polymetalických konkrécií

Polymetalickú konkréciu spravidla tvorí jadro a koncentricky narastené vrstvy hydroxidov a oxidov železa

a mangánu. Jadrom môžu byť zvyšky vulkanoklastického materiálu, litifikované sedimenty, bioklasty alebo fragmenty starších konkrécií.

Hlavné morfológické typy konkrécií v oblasti CCZ sú diskoidné (D), elipsoidné (E), sféroidné (S), tabuľovité (T), polyjadrové (P), hroznovité (b), nepravidelné (I) a fragmenty (f).

Morfológia konkrécií je podmienená ich genézou, minerálnym zložením, veľkosťou, vekom, ako aj zdrojmi prvkov (Kotliński, 1998, obr. 8). Konkrécie majú najčastejšie nasledujúce textúry: koncentrické pásikavé, dendritické, masívne a stĺpcovité. Vrstvy sú často popretínané inými vrstvami, čo svedčí o hiatoch pri raste konkrécií. Konkrécie sú často popraskané, väčšinou radiálne alebo tangenciálne. Praskliny sú následkom vnútorného pnutia, ktoré sa vyskytuje v procesoch dehydratácie a rekryštalizácie počas rastu vrstiev konkrécií, alebo sú následkom diagenetických procesov. Zvyčajne sú vyplnené ílovými minerálmi alebo rekryštalizovanými Mn minerálmi (Kotliński, 1998). Veľkosť konkrécií v oblasti CCZ sa pohybuje od mikroskopických častíc po pelety s priemerom viac ako 20 cm.

Na klasifikáciu konkrécií sa používa viacero klasifikácií berúcich do úvahy ich veľkosť, tvar, zloženie a počet jadier, hrúbku kôry, ako aj minerálne a chemické zloženie (napr. Meylan, 1974; Moritani et al., 1977; Anikeeva et al., 1984; Halbach et al., 1981; Stackelberg a Beiersdorf 1991; Haynes et al., 1985; Kotliński, 1998). Klasifikácia prijatá MOMD pre oblasť CCZ (ISA, 2010b) definuje tri hlavné typy konkrécií vzhľadom na ich povrchovú morfológiu:

- typ S (hladký povrch, *S-smooth*),
- typ R (drsňý povrch, *R-rough*),
- type S-R (kombinovaný povrch).

Tieto hlavné typy zodpovedajú trom hlavným genetickým typom: hydrogenetický (H), diagenetický (D) a hydrogeneticko-diagenetický (HD). Genetické typy sú charakterizované rozdielnym mineralogickým a chemickým zložením a rôznym podielom prírastku Mn (tab. 9, obr. 9).

Konkrécie typu H majú relatívne nízky priemerný obsah Mn, Ni a Cu a v porovnaní s typmi HD a D sú obohatené o Fe a Co, zaznamenaný bol aj vyšší obsah prvkov vzácnych zemín (Kotliński et al., 1997, 1999). Hlavné minerálne zložky predstavujú mikrokryštály vernaditu a goetit. Pomer Mn/Fe, jeden z najdôležitejších parametrov pri určovaní genotypu konkrécií, je obvykle nižší ako 4. Majú hladký povrch (typ S), sú zvyčajne sféroidné alebo nepravidelne sféroidné, veľkosť je menšia ako priemer 4 cm. Jadrá konkrécií väčšinou predstavuje sopečné sklo, ktoré sa neskôr halmýrolýzou transformujú na ílové minerály (zeolity), prítomné sú aj fragmenty bioklastov. V okolí jadra sa vrstvy minerálov Mn a Fe striedajú s ílovými minerálmi. Konkrécie sú často popraskané a vyznačujú sa prítomnosťou sekundárnych žíl naplnených ílovými alebo mangánovými minerálmi. Miera rastu je asi 1 mm/1 mil. rokov. Konkrécie typu H sa zvyčajne vyskytujú na vápenatých kaloch nad zónou CCD (*Carbonate Compensation Depth* – hĺbka karbonátovej kompenzácie).

Konkrécie typu D vykazujú vyšší obsah Mn, Ni, Cu a Zn a nižší obsah REE. Hlavnými minerálmi mangánu sú todorokit a birnessit. Pomer Mn/Fe je vyšší ako 5. Konkrécie sú zvyčajne diskoidné alebo elipsoidné, s veľkosťou 6 až 12 cm (alebo viac). Vyznačujú sa silne diferencovanou alebo asymetrickou štruktúrou s drsným povrchom (typ R). Jadrá sú zvyčajne reprezentované fragmentmi starších konkrécií alebo bioklastov. Vykazujú masívnu, radiálnu, dendritickú alebo kolomorfnú štruktúru a vyznačujú sa prítomnosťou radiálnych trhlín. Vyznačujú sa aj zreteľne viditeľnou zmenou minerálov Mn (čierné vrstvy) a Fe (červenohnedé vrstvy), ako aj rozdielnou rýchlosťou rastu – v prípade minerálov Mn je dvakrát vyššia ako v prípade minerálov Fe. Koncentrácia Ni a Cu je spojená s vrstvami Mn a minerály Fe sú často oddelené vrstvou vulkanického kalu. Vrstvy minerálov Mn a Fe sú hrubšie ako tie, ktoré boli pozorované v konkréciách typu H, a dosahujú 1,5 až 2,0 mm. Odhaduje sa, že rýchlosť rastu týchto konkrécií je 5 až 15 mm/1 000 000 rokov (Amann, 1992). Tento typ sa vyskytuje na povrchu dna, ponorený do polotekutej vrstvy, obvyčajne spočívajúcej na rádiolárových kremelinových kaloch alebo polygénnych íloch pod zónou CCD.

Konkrécie typu HD sú zmiešaný (prechodný) typ medzi H a D, a to vzhľadom na formu výskytu, ako aj veľkosť a zloženie. Hlavným minerálom mangánu je birnessit (7 Å manganit) s premenlivým pomerom amorfnej a kryštalickej fázy. Pomer Mn/Fe sa pohybuje medzi 4 a 5. Konkrécie majú často elipsoidný, tabuľovitý alebo diskoidálny (sploštený) tvar, horný povrch je hladký a vystavený morskej vode, zatiaľ čo spodná časť je drsná a ponorená do polotekutej vrstvy. Typickým znakom je prítomnosť prstencového vydutia, vytvoreného v kontaktnej zóne medzi morskou vodou a polotekutým sedimentom.

V prieskumnej oblasti IOM bol opísaný dodatkový podtyp diagenetických konkrécií D1. Charakterizuje ho vyššia koncentrácia Cu ako Ni. Okrem toho boli opísané kôry (C – *crusts*) vystupujúce na tvrdých substrátoch (Kotliński a Stoyanova, 2009).

Distribúcia genetických typov polymetalických konkrécií v prieskumnom území IOM je znázornená na obr. 10.

V sektore B1 prevládajú konkrécie s priemerom 2 až 4 cm (dominuje genetický typ H) a viac ako 8 cm (dominuje genetický typ HD a D). V severnej a strednej časti sektora B2 prevládajú konkrécie s veľkosťou 2 – 4 cm a viac ako 8 cm, zatiaľ čo v južnej časti s veľkosťou 2 – 4 cm. Genetické typy H a HD sú zastúpené hlavne frakciou 2 – 4 cm. Genotyp D charakterizujú najmä konkrécie s priemerom 4 – 6 cm a viac ako 8 cm, zatiaľ čo genotyp D1 vykazuje prakticky homogénne rozdelenie frakcií. Medzi veľkosťou konkrécií a hĺbkou ich výskytu nebola preukázaná jednoznačná závislosť.

Priestorová distribúcia konkrécií

Konkrécie zvyčajne vystupujú na povrchu morského dna (ponorené do polotekutej aktívnej vrstvy sedimentu), často sú však prekryté sedimentmi. Prekrytie sedimentmi sa vyskytuje na približne 70 % skúmaných miest v prieskumnej oblasti IOM. Všeobecne sa rozsah prekrytia

zväčšuje s hĺbkou a v smere zo severu na juh (Abramowski a Kotlínski, 2011).

Na kvantitatívny opis rozsahu pokrytia sa používa parameter index pokrytia, ktorý je vyjadrený pomerom medzi plochou pokrytia konkréciami na laboratórnej šablóne (štvorcovej sieti) vo vzťahu k ploche pokrytia konkréciami vypočítanej z fotografie dna na mieste odberu vzorky (stanici). Najnižšia hodnota parametra je 1 (bez pokrytia). Na niektorých staniciach sa pozoruje 100 % pokrytie konkrécií sedimentom.

Pokiaľ ide o morfológiu dna, vzorky s vysokým výskytom konkrécií sa našli na všetkých morfológických typoch morského dna. V porovnaní s výskytom na svahoch hrastí a priekop sa však najväčší výskyt zistil na rovnom alebo mierne zvlnenom teréne.

V rámci prieskumného územia IOM sa konkrécie vyskytujú v hĺbkovom rozsahu 3 800 – 4 750 m, s najvyššou hustotou uloženia a frekvenciou výskytu zaznamenanou v hĺbkovom rozsahu 4 300 – 4 500 m. Analýza súvisiaca s hĺbkou ukazuje, že priemerná hustota uloženia sa postupne zvyšuje až do hĺbky 4 500 m (najväčšia hustota uloženia je v hĺbke 4 300 – 4 500 m) a s hĺbkou viac ako 4 500 m sa výrazne znižuje. Niektoré zákonitosti výskytu môžu súvisieť s kritickou hĺbkou kompenzácie uhlíčanov (CCD), ako aj s genetickým typom konkrécií (ISA, 2010a; Kotlínski, 2003, 2011):

- pri hĺbke okolo 4 200 m dominujú malé (< 4 cm) sféroidné konkrécie hydrogenetického typu (H) s hladkým povrchom, vyšším obsahom Fe (10,32 %) a Co (0,23 %) a relatívne nižším obsahom Mn, Ni a Cu;
- v hĺbke medzi 4 200 a 4 400 m prevládajú konkrécie hydrogeneticko-diagenetického typu (HD) s vyšším obsahom Mn (> 30,5 %), Ni a Cu a relatívne nižším obsahom Co (< 0,18 %);
- pod hranicou CCD (< 4,500 m) sa vyskytujú konkrécie diagenetického typu (D), diskoidné a elipsoidné, s veľkosťou 6 – 12 cm a drsným povrchom.

Všeobecne v smere zo S na J klesá výskyt konkrécií typu H a HD s modálnou veľkosťou < 6 cm, zatiaľ čo výskyt konkrécií typu D s modálnou veľkosťou > 6 cm sa postupne zvyšuje (Kotlínski, 2003; Kotlínski, 2011). Prejavuje sa to aj v priestorovom rozložení obsahu kovov v rámci prieskumnej oblasti.

Geotechnické vlastnosti polymetalických konkrécií

Fyzikálne, mechanické a technologické vlastnosti polymetalických konkrécií sa v rámci prieskumnej činnosti IOM skúmajú s cieľom poskytnúť informácie a údaje na výber vhodnej ťažobnej technológie (Dreiseitl, 2012).

Základné fyzikálne vlastnosti konkrécií, ktoré sa stanovujú v lodnom laboratóriu, sú obsah vody (vlhkosť) a objemová hmotnosť. Okrem toho sa vypočítavajú ďalšie parametre, ako je objemová hmotnosť suchých konkrécií (sušenie prebieha 72 hodín pri teplote 105 °C), pórovitosť, koeficient pórovitosti a merná hmotnosť. Prirodzený obsah vody w_n je pomer hmotnosti odparenej vody k hmotnosti vzorky mokrej konkrécie. Pri analýze obsahu vody (w)

a prirodzeného obsahu vody (w_n) sa musí brať do úvahy obsah soli v morskej vode prítomnej v póroch konkrécie (predpokladaný $M = 35$ %). Merania potvrdzujú, že morská voda predstavuje 1/3 celkovej hmotnosti konkrécií, čo je potrebné brať do úvahy pri kalkuláciách transportu. Základné fyzikálne parametre konkrécií sú uvedené v tab. 10 a 11.

Štatistická analýza fyzikálnych parametrov konkrécií preukázala určitú závislosť vo vzťahu k veľkosti (frakcie) konkrécií. Malé konkrécie majú pomerne nízku hustotu a vysoký obsah vody oproti konkréciám väčších rozmerov, zatiaľ čo maximálnu hustotu a minimálny obsah vody pozorujeme v konkréciách s veľkosťou 8 – 10 cm. Konkrécie s veľkosťou > 10 cm sa postupne rozpadajú, čo pravdepodobne súvisí s ich narastajúcim vekom.

Jediným parametrom pevnostnej charakteristiky určovaným priamo v palubnom laboratóriu bola jednoosová pevnosť v tlaku vyjadrená v MPa. Táto vlastnosť vyjadruje tlak, ktorý je potrebné vyvinúť na deštrukciu konkrécie. Ako uvádza Dreiseitl (2012), nezávisí od genotypu konkrécie, ale od jej morfotypu (sféroidné konkrécie sú tvrdšie ako diskoidálne a elipsoidálne), a najmä od jej veľkosti (čím menšia konkrécia, tým je potrebný väčší tlak). Hodnota parametra je uvedená v tab. 12. Obrázok 11 znázorňuje trendy v jednoosovej pevnosti v tlaku merané počas 2 expedícií (2001 a 2004).

Znalosť technologických vlastností konkrécií je nevyhnutná pri ich ťažbe aj preprave z miesta ťažby do spracovateľského závodu na pevnine. V rámci výskumu na vzorkách z prieskumnej oblasti IOM sa určujú nasledujúce technologické vlastnosti (Dreiseitl, 2012):

- merná sila odtrhnutia (kPa),
- sypná hmotnosť (kg/m^3),
- uhol prirodzenej sklonitosti, resp. svahový uhol ($^\circ$, stupeň).

Merná sila odtrhnutia je sila potrebná na oddelenie konkrécie od sedimentu. V praxi sa však určuje odpor proti odtrhávacej sile. Dodatočne sa musí vypočítať plocha kontaktu konkrécie so sedimentom. Preto je odpor sily pri odtrhnutí vyjadrený v kPa. Merná sila odtrhnutia sa určuje na konkréciách v *box-coreri* hneď po jeho vyzdvihnutí z morského dna. Táto vlastnosť môže byť dôležitá pri určovaní techniky zberu konkrécií z morského dna. Analýza IOM preukázala, že neexistuje žiadny vzťah medzi morfotypom konkrécie a mernou silou odtrhnutia, ale maximálne hodnoty mernej sily odtrhnutia pri veľkých konkréciách (8 – 10 a 10+ cm) sú nižšie ako maximálne hodnoty mernej sily odtrhnutia pri stredne veľkých konkréciách (4 – 6 a 6 – 8 cm). Hodnoty parametra vo vzťahu k veľkosti (frakcii) konkrécií sú uvedené v tab. 13.

Predpokladá sa, že povrch konkrécie hrá hlavnú úlohu v odpore proti vytrhnutiu, t. j. drsný povrch zvyšuje silu, ktorou je konkrécia vyťahovaná zo sedimentu v porovnaní so silou, ktorá je potrebná na vytiahnutie konkrécie s hladkým povrchom.

Sypná hmotnosť a svahový uhol uloženia konkrécií budú dôležitými parametrami pri nakladacích a prekladacích operáciách (ťažobné plavidlo/transportné plavidlo/skladovanie/pevná preprava). Parametre sa zisťovali spracovaním veľkoobjemových vzoriek získaných pomocou

vlečnej siete počas expedícií IOM-2009 a IOM-2014 (tab. 14).

Sypná hmotnosť r_{app} poskytuje údaj o množstve (hmotnosti) konkrécií, ktoré sa vojde do nádoby s objemom 1 m³. Priemerná sypná hmotnosť konkrécií (expedícia IOM-2009, 3 skúšky) bola vypočítaná na $r_{app} = 1,242 \text{ kg/m}^3$. Po utrasení a doplnení nádoby konkréciami bola maximálna sypná hmotnosť stanovená na $r_{appmax} = 1,342 \text{ kg/m}^3$.

Svahový uhol bol stanovený ako dotyčnica uhla α medzi výškou haldy konkrécií a polomerom haldy. Svahový uhol v prípade vzorky získanej vlečnou sieťou počas expedície IOM-2009 bol stanovený na 37° a počas expedície IOM-2014 na 31° (tab. 14).

Hustota uloženia

Hustota uloženia PMK na morskem dne (kg/m²) sa dá odhadnúť dvomi spôsobmi:

- z výsledkov vzorkovania *box-corerom* – vydelením hmotnosti získaných konkrécií plochou pokrytou otvorenými čelustami vzorkovača (0,25 m²);
- využitím snímkov sonaru alebo fotografií s aplikáciou kalibračných faktorov.

Obe metódy poskytujú mierne odlišné výsledky. Je to spôsobené viacerými faktormi, najmä tým, že konkrécie zasypané sedimentmi sú na fotografiách ťažšie identifikovateľné (Kotlínski a Stoyanova, 2009), ako aj faktom, že hodnotené oblasti majú rôznu veľkosť. V druhej metóde korelujú hodnoty *backscattera* (intenzity zvukovej vlny odrazenej od morského dna) viac s parametrom veľkosti konkrécií ako s ich počtom (Rühlemann et al., 2011).

Hustota uloženia sa udáva v kg/m² a obvykle sa vzťahuje na mokré vzorky. Analýza priestorového rozloženia hustoty uloženia v rámci CCZ poukazuje na jeho veľkú variabilitu (Morgan, 2009). Hustota uloženia PMK v prieskumnom území IOM sa pohybuje v rozmedzí 0,1 – 28,4 kg/m².

Priestorový opis ložiska

Perspektívne konkrécionosné polia na budúcu ťažbu boli vymedzené v rámci sektorov B1 a B2 v oblastiach s priemernou hustotou uloženia vyššou ako 10 kg/m² a sklonom morského dna max. 7°. Ich celková plocha bola odhadnutá na 33 900 km² (obr. 12). Topografia morského dna má rozhodujúci vplyv na kontúry, veľkosť a tvary rudných telies ložiska. Rudné telesá predstavujú pretiahnuté šošovky (pásky) a zložené šošovkovité tvary s šírkou 2 – 10 km a dĺžkou až niekoľko desiatok kilometrov, kopírujúc okraje podmorských depresíí a chrbtov. V oblastiach s väčšími rovnými plochami dosahujú rudné polia šírku až do 70 km a dĺžku do 120 km. Líšia sa rozsahom i tvarom (Kotlínski, 2003).

V hraniciach sektora B2 boli vyčlenené dva prieskumné bloky: H11 a H22. V rámci týchto prieskumných blokov boli identifikované oblasti rudných polí H22_NE, H22_MID, H11_PR2, H11_PR3 and H22_NW. Najperspektívnejšie rudné pole H22_NE pozostáva zo štyroch rudných telies: RZ_09, RZ_10, RZ_11 a RZ_12. Predstavuje typické pásmové ložisko tvorené šošovkovitými pretiahnutými rudnými poľami. Celková plocha rudných

telies tu dosahuje 625 km². Hustota vzorkovania dosiahla hodnotu 1 stanica (*box-corer*)/31 km². Hĺbka dna tu dosahuje od 4 249 do 4 501 m. Priemerná hustota uloženia mokrých PMK bola na základe vzorkovania stanovená na 15,7 kg/m². Prevažuje diagenetický typ konkrécií, index pokrytia sedimentom sa pohybuje od 1 (žiadne prisýpanie konkrécií sedimentom) do 1,6.

Výpočet zásob a zdrojov

Zdroje polymetalických konkrécií sa odhadovali v dvoch etapách. Počas prvej etapy (2007) boli na odhadnutie zdrojov v sektorech B1 a B2 vytvorené dve pracovné skupiny (Mucha et al., 2007; Shanov et al., 2007). Obe pracovné skupiny vykonali odhad nezávisle, so zameraním na zdroje polymetalických konkrécií a vybraných kovov: Mn, Ni a Mo (skupina 1) a Co, Cu a Zn (skupina 2). Výsledky tohto odhadu boli založené na údajoch získaných počas expedícií do roku 2004, ktoré sa orientovali na regionálny prieskum. Počas druhej etapy (2011, 2015) boli odhadnuté zdroje konkrécií a hlavných kovov (Co, Cu, Mn a Ni) v rámci prieskumných blokov H11 a H22 v centrálnej časti sektora B2. Zdrojom údajov boli expedície organizovaná v rokoch 2009 a 2014 a následne boli vypočítané zdroje (Mucha et al., 2011, 2015). V roku 2016 boli minerálne zdroje prvýkrát klasifikované podľa systému CRIRSCO a v rámci súhrnného dokumentu uvedené v technickej správe (Szamalek et al., 2016).

Do výpočtu zásob a zdrojov sú zahrnuté len konkrécie ležiace na morskem dne nachádzajúce sa v povrchovej vrstve do hĺbky okolo 10 – 15 cm. Hlbšie pochované konkrécie, ktoré sa v oblasti prieskumného územia IOM taktiež vyskytujú, neboli vo výpočte zohľadnené vzhľadom na predpokladané dobývacie metódy. Vzhľadom na vysokú variabilitu (zvyčajne rádovo vyššiu, ako je variabilita obsahu kovov) za kľúčový parameter pri odhade minerálnych zdrojov polymetalických konkrécií sa považuje hustota uloženia uvádzaná v kg/m². Spôsob uloženia konkrécií na morskem dne, resp. v povrchovej vrstve definuje ložisko ako dvojrozmerné. Tomu je prispôsobená metódika odhadu minerálnych zásob a zdrojov.

Metodika výpočtu

Množstvo polymetalických konkrécií a kovov obsiahnutých v nich bolo odhadnuté osobitne v sektorech B1 a B2 a v prieskumných blokoch H11 a H22. Odhad množstva polymetalických konkrécií a kovov obsiahnutých v nich a priemerný obsah kovov v rámci blokov sa robil geoštatistickou metódou bežného blokového krigingu (Journel a Huijbregts, 1978; Matheron, 1963) s aplikáciou Yamamotovej korekcie (Yamamoto, 2005). Pred odhadom boli štruktúry priestorovej variability parametrov ložiska (hustota uloženia a obsah kovov) modelované pomocou smerových a všesmerových semivariogramov. Výpočet sa uskutočnil pre základné výpočtové bloky s rozmermi 500 x 500 m umiestnené v rudných telesách s vylúčením zón bez výskytu konkrécií, podmorských vulkánov a oblastí, kde sklon dna oceánu presahoval 7°.

Štruktúrny geoštatistický opis variability hustoty uloženia, ilustrovaný smerovou semivariogramovou mapou

pre kombinované údaje zo sektorov B1 a B2, indikuje slabú anizotropiu parametrov pri veľkom rozsahu pozorovaní, najmä pri vzdialenostiach väčších ako 50 km, a silnú lokálnu variabilitu, predstavovanú výrazným nugetovým efektom (obr. 13). Minimálna variabilita je v smere S – J, maximálna v smere V – Z. Minimálna variabilita súvisí so smerom uloženia rudných telies. Pri krigingu boli použité rovnice empirických modelov semivariogramu (obr. 14). Odhad zdrojov pri každom výpočtovom bloku zahŕňal hustotu uloženia a obsah kovov, odvodené z ôsmich najbližších vzoriek. Celkové zdroje sektorov a blokov boli vypočítané súčtom hodnôt v základných výpočtových blokoch. Správnosť modelovania sa overila pomocou krížovej validácie (Isaaks a Srivastava, 1989).

Priemerné hodnoty hustoty uloženia a obsahu kovov v prieskumných blokoch H11 a H12 sú uvedené v tab. 15. Prepočítavací koeficient z mokrých konkrécií na suché je 0,7. Hodnoty štandardnej chyby odhadu pri výpočte zdrojov pri medznej hodnote 10 kg/m² v základných výpočtových blokoch sú pomerne nízke a dosahujú okolo 8 % v sektore B1, 3 % v sektore B2 a 5 % v prieskumných blokoch H11 a H22.

Krivky hustoty uloženia/tonáže v prieskumných blokoch H11 a H22 sú na obr. 15 a 16.

Príklad znázornenia hustoty uloženia PMK v prieskumných blokoch je na obr. 17. Hustota uloženia a obsah kovov boli odhadnuté v základných výpočtových blokoch s rozmermi 500 x 500 m. Z výpočtu boli vylúčené oblasti bez výskytu konkrécií, vulkanických zón a oblastí, kde svah oceánskeho dna prekračuje 7°.

Klasifikácia zásob

Podľa smerníc CRIRSCO (*Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards* – Výbor pre medzinárodné štandardizácie vykazovania minerálnych zásob) boli zdroje polymetalických konkrécií kategorizované v sektoroch B1 a B2 ako odvodené (*inferred*) a v prieskumných blokoch H11 a H22 ako indikované (*indicated*). Takáto kategorizácia je odôvodnená rôznymi priemernými intervalmi vzorkovania v rámci prieskumných sektorov a blokov. V prieskumných sektoroch B1 a B2 sú priemerné intervaly odberu vzoriek 11, respektíve 15 km. V prieskumných blokoch H11 a H22 je priemerný interval vzorkovania približne 7 km (Szamalek et al., 2016).

Výsledky odhadu zásob a zdrojov v prieskumnom území IOM sú uvedené v tab. 16. Predložený variant výpočtu zohľadňuje medznú hodnotu (*cut-off*) hustoty uloženia PMK 10 kg/m² (v mokrom stave) a predstavuje základný scenár odhadu zásob a zdrojov na potenciálnu ťažobnú činnosť. Stav zásob a zdrojov sa vzťahuje na dátum jún 2016. V tejto fáze vývoja projektu boli odhadnuté len zdroje nerastnej suroviny. Odhad v kategórii zásob sa predpokladal po ďalšej expedícii, zahustení vzorkovania a novom výpočte.

V súčasnej fáze geologického prieskumu rozlišujeme nasledujúce hlavné faktory ovplyvňujúce presnosť odhadu zdrojov polymetalických konkrécií:

- vysoká variabilita početnosti konkrécií (koeficient variácie $v = 60\%$),
- významný podiel náhodnej zložky v celkovej pozorovanej variabilite početnosti,

- vysoké priemerné vzdialenosti odberu vzoriek (zhruba 11 km v sektore B1, 15 km v sektore B2 a 7 km v prieskumných blokoch H11 a H22).

Presnosť celkového odhadu zdrojov polymetalických konkrécií v prieskumnej oblasti možno považovať za uspokojivú (štandardná chyba asi 5 %). Pri menších plochách (rádovo stovky km² – napr. rudné telesá a rudné polia) môže byť očakávaná štandardná chyba okolo 10 %. V prípade blokov s rozlohou asi 1 km² však môže byť štandardná chyba odhadu významná (viac ako 20 %). Preto bolo v období predĺženia kontraktu po roku 2016 naplánované zahustenie vzorkovacích bodov v prieskumnom bloku H22, ktorý bol vybraný na detailný prieskum.

Zvýšenie presnosti odhadov zdrojov, najmä v menších oblastiach, akými sú rudné telesá, možno dosiahnuť (Szamalek et al., 2016):

- použitím pokročilých geoštatistických metód,
- aplikáciou moderných metód analýzy fotografií morského dna s použitím nepriameho vyhodnotenia hustoty uloženia PMK na základe snímok morského dna (táto metóda nevyžaduje dodatočné vzorkovanie oceánskeho dna).

Záver

IOM mal v roku 2016 spracované dostatočné množstvo vzorkového materiálu požadovanej kvality na klasifikáciu minerálnych zdrojov v kategóriách odvodené zdroje (*Inferred Resources*) a indikované zdroje (*Indicated Resources*). Využitelnými kovmi sú mangán, nikel, kobalt, meď a zinok. Ostatné kovy s potenciálnou hodnotou (Mo, Fe, Li a REE) neboli do roku 2016 predmetom výpočtu zásob a zdrojov, v budúcnosti však môžu (v závislosti od dostupnosti využiteľných technológií) predstavovať pridanú hodnotu projektu. Geologický prieskum potvrdil, že presnosť odhadov obsahu kovov je uspokojivá v oblastiach akejkoľvek veľkosti, a to vďaka nízkej variabilite ako dôsledku stabilného chemického zloženia polymetalických uzlín. Variabilita je podstatne vyššia v prípade hustoty uloženia konkrécií, ktorá sa mení s veľkosťou hodnotenej oblasti. Nerastné zdroje boli vypočítané pri rôznych medzných hodnotách hustoty uloženia PMK. Zvoleným základným scenárom je medzná hodnota 10 kg/m² (vo vlhkom stave).

Na plánované predbežné ekonomické hodnotenie boli vybrané indikované zdroje (*Indicated Resources*) v prieskumných blokoch H11 a H22. Vzhľadom na nízky stupeň overenia do ekonomického hodnotenia nebudú vstupovať odvodené zdroje (*Inferred Resources*) vypočítané vo zvyšnej oblasti sektorov B1 a B2. Budúce aktivity v oblasti prieskumu IOM budú zamerané na detailný prieskum vybraných blokov a zvýšenie kategórie zdrojov/zásob. Geologické údaje spolu s ostatnými dátami získanými pri technologickom výskume ťažobných a spracovateľských metód, ako aj pri environmentálnom výskume predstavujú základ tvorby komerčného modelu využitia ložiska formou štúdie využiteľnosti.

Doručené / Received:	5. 6. 2021
Prijaté na publikovanie / Accepted:	30. 6. 2021