

## Ekspedycja IODP 360: pierwszy etap odwiertu do płaszczka Ziemi

Jakub Ciałęła<sup>1,2</sup>, Henry J.B. Dick<sup>3</sup>, Chris J. MacLeod<sup>4</sup>, Peter Blum<sup>5</sup>, Naukowcy Ekspedycji 360<sup>6</sup>



J. Ciałęła

H.J.B. Dick

C.J. MacLeod

P. Blum

**IODP Expedition 360: first stage of drilling into Earth's Mantle.** Prz. Geol., 64: 889–895.

*Abstract.* The aim of this paper is to provide a report on the IODP expedition 360 to the Polish geoscientific community. Expedition 360 to the Atlantis Bank along the Southwest Indian Ridge was Leg 1 of the SloMo Project. The primary objective of the SloMo Project is to test competing hypotheses on the nature of the Moho at the slow-spreading oceanic lithosphere. Based on a seismic survey and geologic mapping, the Moho beneath Atlantis Bank is believed to represent

a serpentinization front, and not an igneous boundary between gabbro and peridotite. Expedition 360 started on November 30, 2015 in Colombo (Sri Lanka), and ended on January 30, 2015 in Port Louis (Mauritius). Hole U1473A was drilled 790 m through massive gabbro. Core recovery ranges from 44 to 96% towards the bottom of the hole, where excellent drilling conditions occurred. This deepest single-leg basement hole drilled into ocean crust is in overall good condition and can be re-entered at Leg 2. For the first time, a Polish nominee has been selected for the scientific party of an oceanic IODP expedition. The mantle drilling project raised much attention in the Polish media. One hundred rock samples have been collected to investigate in Poland.

**Keywords:** Moho, mantle, lower crust, expedition 360, IODP, Atlantis Bank

Artykuł podsumowuje cele, przebieg i wyniki Ekspedycji 360 z perspektywy pierwszego polskiego udziału w wyprawie oceanicznej International Ocean Discovery Program (IODP). Ekspedycja jest pierwszym etapem projektu SloMo, zmierzającego do przewiercenia się przez dolną skorupę oceaniczną do górnego płaszczka Ziemi. Idea odwiertu do płaszczka Ziemi pojawiła się po raz pierwszy w 1957 r., zaproponowana przez Harry'ego Hessa. Pomysł Hessa uzyskał początkowo akceptację kongresu amerykańskiego i rozpoczął się w 1961 r. pod nazwą projektu Mohole (Dick i in., 2006). Po pierwszej ekspedycji, w której prze-wiercono się przez 170 m skał osadowych i kilka metrów bazaltu (Teagle & Ildefonse, 2011), finansowanie zostało jednak wstrzymane. Od tego czasu propozycja odwiertu do płaszczka Ziemi rzadko powracała, jako że 6–7-kilometrowy odwiert w skorupie oceanicznej wydawał się niewykonalny (na taką głębokość płaszczka pod skorupą oceaniczną wskazywały interpretacje danych sejsmicznych oraz badania nad ofiolitami – np. Klein, 2003).

Sytuacja zmieniła się w dwóch ostatnich dekadach, kiedy udokumentowano dwie nowe cechy skorupy oceanicznej

wzdłuż grzbietów oceanicznych o wolnym tempie spreadingu. Po pierwsze wykazano, że jest ona niejednorodna i może być nawet o 2–4 km cieńsza niż skorupa wzdłuż grzbietów oceanicznych o szybkim tempie spreadingu (Nicolas, 1995; Cannat, 1996; Muller, 1997). Chociaż sejsmiczne Moho pod skorupą o wolnym tempie spreadingu także występuje na głębokości 6–7 km, prawdopodobnie nie reprezentuje ono granicy płaszczka i skorupy (ryc. 1). Uważa się natomiast, że na takiej głębokości może znajdować się granica serpentynizacji skał płaszczka (Muller, 1997; Dick i in., 2006, 2015). Uzasadnieniem powyższej hipotezy jest fakt, że serpentynyty wykazują gęstość i prędkość rozchodzenia się fal sejsmicznych podobną do gabra, dlatego mogą być mylone z gabraami w obrazie sejsmicznym (Miller & Christensen, 1997).

Drugą niedawno odkrytą cechą skorupy oceanicznej powstałej wzdłuż grzbietów o wolnym tempie spreadingu są liczne wychodnie skał gabrowych i perydotytów odsłonięte przez niskokątowe uskoki normalne nazywane *detachment faults*. Oznacza to, że górna skorupa oceaniczna złożona z bazaltów i dajek została w tych miejscach

<sup>1</sup> Instytut Geologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, ul. Bogumiła Krygowskiego 12, 61-680 Poznań, Polska; ciazela@amu.edu.pl.

<sup>2</sup> Institut für Mineralogie, Leibniz Universität Hannover, Callinstr. 3, 30167 Hannover, Niemcy, 0049 511 762 2322; j.ciazela@mineralogie.uni-hannover.de.

<sup>3</sup> Department of Geology and Geophysics, Woods Hole Oceanographic Institution, MS #8, McLean Laboratory, Woods Hole MA 02543-1539, USA.

<sup>4</sup> Department of Earth Sciences, Cardiff University, PO Box 914, Main College, Park place, Cardiff Wales CF10 3AT, Wielka Brytania.

<sup>5</sup> International Ocean Discovery Program, Texas A & M University, 100 Discovery Drive, College Station TX 77845-9547, USA.

<sup>6</sup> Pozostali naukowcy uczestniczący w ekspedycji: Natsue Abe, Donna K. Blackman, Julie A. Bowles, Michael J. Cheadle, Kyungo Cho, Jeremy R. Deans, Virginia P. Edgcomb, Carlotta Ferrando, Lyderic France, Biswajit Ghosh, Benoit M. Ildefonse, Mark, A. Kendrick, Juergen Koepke, James A.M. Leong, Chuanchou Liu, Qiang Ma, Tomoaki Morishita, Antony Morris, James H. Natland, Toshi Nozaka, Oliver Pluemper, Alessio Sanfilippo, Jason B. Sylvan, Maurice A. Tivey, Riccardo Tribuzio, Luis G.F. Viegas; Texas A & M University, College Station, Texas, United States.

zerodowana. Owe wychodnie dolnej skorupy i skał płaszczu nazwano *ocean core complexes* (OCC), a ich znana do dzisiaj liczba przekroczyła już 170 (Ciazela i in., 2015).

W projekcie SloMo miejsce odwiertu, Atlantis Bank OCC, zostało usytuowane w obrębie skorupy o wolnym tempie spreadingu (ryc. 2), a górna skorupa oceaniczna została zerodowana podczas aktywności *detachment fault*. Dzięki temu odwiert zaczyna się bezpośrednio w dolnej skorupie, omijając warstwę bazaltów i dajek. Zakłada się zatem, że granica między skorupą i płaszczem w tym miejscu może znajdować się już na głębokości ok. 2 km od powierzchni dna oceanu, a granica sejsmicznego Moho, związanego z frontem serpentynizacji perydotytów, na głębokości ok. 5 km (ryc. 1). Głównym celem projektu jest weryfikacja powyższych założeń.

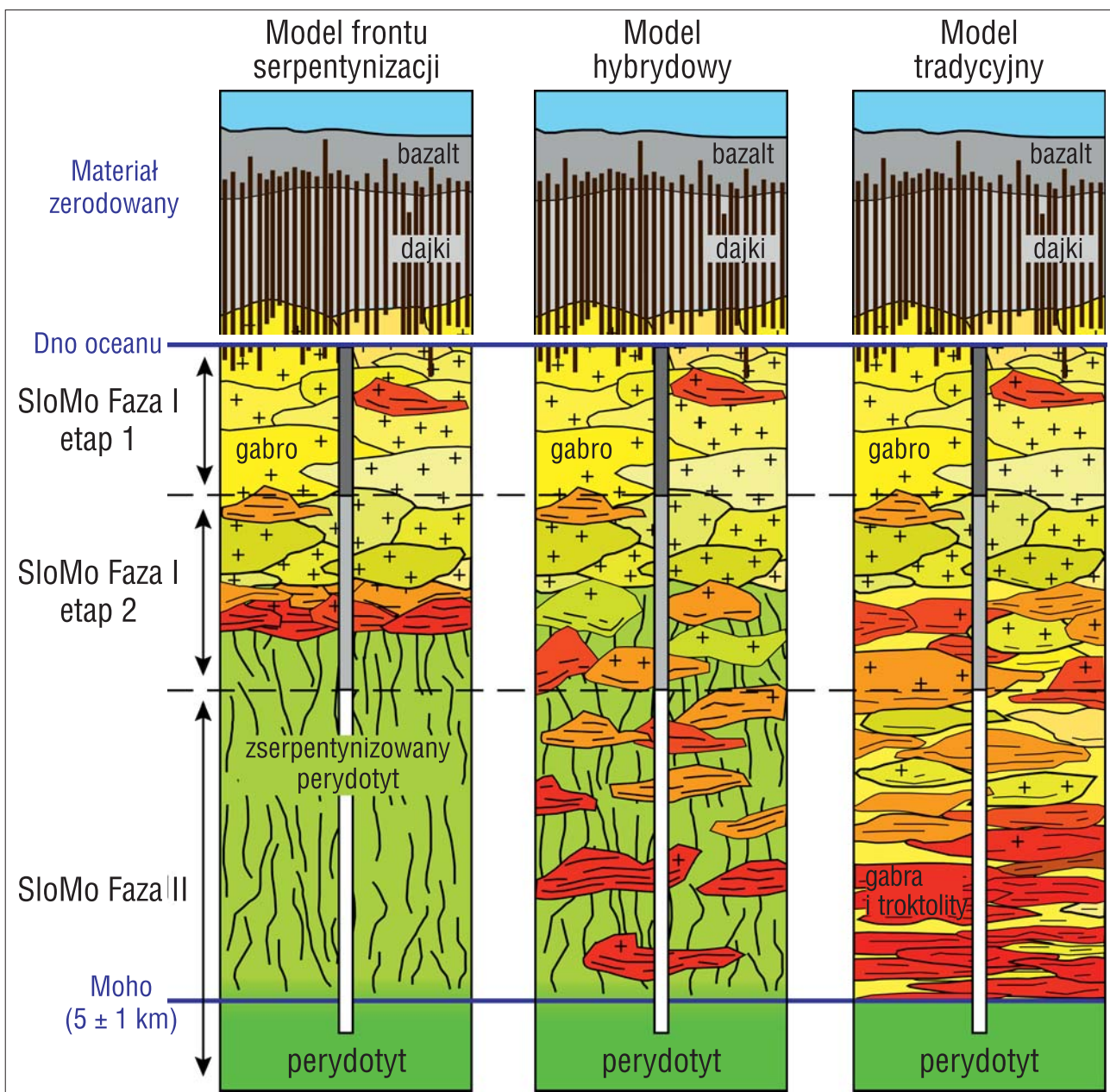
## CELE EKSPEDYCJI

1. Rozpoczęcie długiego otworu U1473, który docelowo może osiągnąć głębokość 6 km, przecinając granicę skorupy i płaszczu na głębokości ok. 2 km oraz powierzchnię nieciągłości Moho na głębokości ok. 5 km.

2. Określenie charakteru transportu stopu magmowego przez skorupę.

3. Korelacja stratygraficzna nowego otworu (U1473A) z otworem 735B z 1997 r., w celu zbadania lateralnej ciągłości dolnej skorupy oceanicznej. Otwór 735B jest położony 2 km na południowy wschód od U1473U (ryc. 2).

4. Określenie geometrii granic pomiędzy zonami magnetycznymi, a w szczególności wykazanie, że pod powierzchnią ziemi są one nachylone (a nie pionowe), oraz określenie czy są one ostre czy gradacyjne.



Ryc. 1. Różne modele litosfery oceanicznej. Podana głębokość powierzchni nieciągłości Moho (5 km) to głębokość mierzona od poziomu dna oceanu (na podstawie Dicka i in., 2016, zmodyfikowane)

5. Oszacowanie stopnia rozwinięcia życia w dolnej skorupie oceanicznej oraz określenie jego różnorodności.

### OBSZAR BADAŃ

Atlantis Bank jest dobrze zbadanym OCC (Robinson i in., 1989; Pettigrew i in., 1999; Dick i in., 2000; Baines i in., 2003, 2007, 2009; John i in., 2004; Schwartz i in., 2010) położonym na 32°40' S i 57°15' E, ok. 100 km na południe od osi doliny ryftowej Grzbietu Południowindyjskiego (ryc. 2), w pobliżu uskoku transformującego Atlantis II. Kompleks ma kształt kopuły o długości 40 km i szerokości 30 km. Wysokość względna kopuły wynosi ok. 5 km. Góruje ona nad dnem uskoku transformującego, położonym na 5700 m p.p.m., osiągając ok. 700 m p.p.m. na płasko zakończonej platformie o powierzchni 25 km<sup>2</sup> (ryc. 2). Platforma jest zbudowana w większości z płasko zapadającego mylonitu gabrowego utworzonego w trakcie powstawania *detachment fault* (Dick i in., 2015). Jest ona częścią masywu gabrowego powstałego ok. 12 mln lat temu (Baines i in., 2009), odsłoniętego na całej szerokości i długości wspomnianej wyżej kopuły. Masyw gabrowy zalega nad perydotytami płaszczą, które formują dolne stoki wschodniej ściany uskoku transformującego Atlantis II.

Trzy poprzednie ekspedycje IODP wywierciły dwa otwory w obrębie Atlantis Bank. Najdłuższy otwór, 735B, jest położony na południowym wschodzie platform (ryc. 2). W ciągu dwóch ekspedycji, 118 i 176, doprowadzono go do głębokości 1508 m p.p.m. Udokumentowano dominację skał gabrowych, od gabr tlenkowych po troktolity (Robinson i in., 1989; Dick i in., 2000). Ekspedycja 179 wywierciła krótszy 158-metrowy otwór 1105A, położony w środku platformy (Pettigrew i in., 1999). Zakończona w tym roku ekspedycja 360 wywierciła 789-metrowy otwór U1473A położony 1 km na północ od poprzedniego otworu 1105A (ryc. 2).

### WYBÓR MIEJSCA ODWIERTU

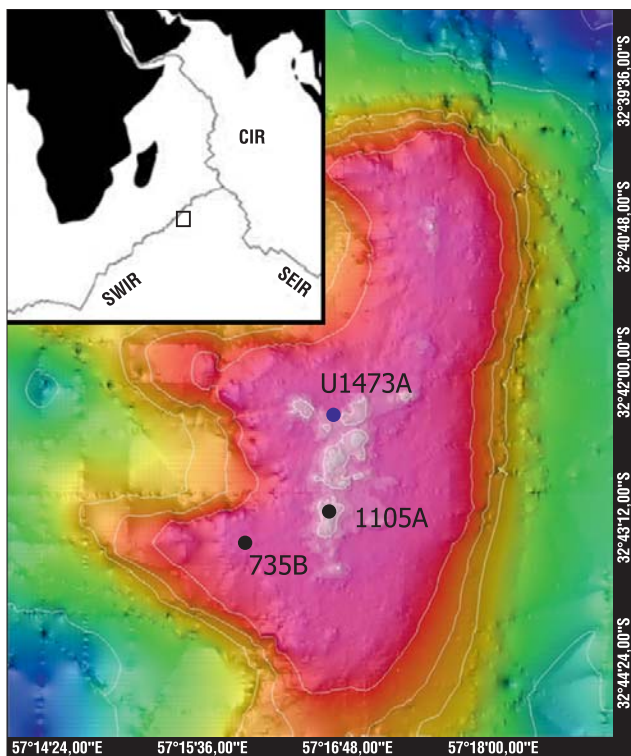
Miejsce odwiertu zostało wybrane tak, żeby oprócz głównego celu projektu związanego z przekroczeniem petrologicznego Moho (por. rozdz. Cele ekspedycji, cel 1), uwzględnić dwa z celów dodatkowych (por. rozdz. Cele ekspedycji, cele 3 i 4). Cel 3 związany z korelacją stratygraficzną między odwiertami wymagał ok. kilometrowych odstępów między nimi, stąd ulokowanie nowego otworu 1 km na północ od otworu 1105A (ryc. 2). Cel 4 wymagał usytuowania odwiertu w pobliżu granicy dwóch magnetozon, która również przebiegała w pobliżu. Ważnym kryterium wyboru miejsca odwiertu była także stabilność instalacji wiertniczej (*re-entry system*), wymagająca usytuowania bezpośrednio w wychodniach skał magmowych. Dlatego zdecydowano się rozpocząć wiercenie w pobliżu 1-metrowego odwiertu BR8 wykonanego za pomocą wiertła Bridge podczas rejsu JR31 z 1998 r. (MacLeod i in., 1998). W rdzeniu wiertniczym udokumentowano bowiem same skały gabrowe bez pokrywy osadowej. Dokładność systemu nawigacyjnego z 1998 r. nie pozwala ustalić miejsca odwiertu BR8 z dokładnością do kilku metrów. Dlatego pozycję startową tylko oszacowano, a wybór konkretnego

miejsca poprzedzono opuszczeniem kamery na przewodzie wiertniczym, w celu rozpoznania podłoża. Od oszacowanej pozycji startowej statek przemieszczał się po kwadratowej spirali, zwiększając ją za każdym razem o 5 m. Odwiert U1473A umiejscowiono 40 m na południe od miejsca startowego w wychodni skał gabrowych o średnicy ok. 30 m, wyniesionej 10 m ponad osady wapienne pokrywające dno oceanu. Jego dokładna pozycja to 32°42.3622' S, 057°16.6880' E, a głębokość dna morskiego w tym miejscu wynosi 710,2 m p.p.m.

### PODSUMOWANIE DZIAŁAŃ OPERACYJNYCH

Z 61 dni ekspedycji, 38 poświęcono na operacje poza-wiertnicze, zarówno planowane (załadunek w porcie, tranzyt, *site survey*, instalację *re-entry system*, pomiary geofizyczne otworu), jak i nieplanowane (czekanie na pogodę, ewakuacja medyczna, wyciąganie uszkodzonych części przewodu wiertniczego, które spadły do otworu). Na samo wiercenie wykorzystano 23 dni. W trakcie tego czasu otwór pogłębiono do 790 m, co oznacza średnią prędkość 34 m/dzień. Przez jeden dzień wiercono bez pobierania rdzenia, 22 dni z pobieraniem rdzenia. Wydobyto 469 m bieżących skały. Szczegółowy przebieg operacji przedstawiono poniżej:

- 30.11–5.12.2015 – załadunek statku w Colombo na Sri Lance (tzw. *port call*);
- 5–16.12.2015 – tranzyt z Colombo do Atlantis Bank;
- 17–19.12.2015 – rozpoznanie, wybór miejsca odwiertu i umiejscowienie na dnie oceanu instalacji *re-entry system*, ułatwiającej umieszczanie przewodu wiertniczego w otworze w trakcie tej i kolejnych ekspedycji. Głównymi komponentami tej instalacji, są lej wprowadzający oraz 10-metrowej długości osłona stabilizująca górną część otworu;
- 19–30.12.2015 – wiercenie z pobieraniem rdzenia do głębokości 410 m; odsetek pobranego rdzenia wyniósł 52%;
- 30.12.2015–7.01.2016 – ewakuacja medyczna jednego z członków załogi, w czasie której statek pokonuje 1320 mil morskich, płynąc w stronę Mauritiusu na spotkanie z helikopterem;
- 7–12.01.2016 – wiercenie z pobieraniem rdzenia do głębokości 482 m, przerwane przez oderwanie się dwóch stożków wiertła i operacje zmierzające do ich wyciągnięcia. Odsetek pobranego rdzenia wyniósł tylko 28%, jako że jest to strefa uskokowa;
- 12–13.01.2016 – wiercenie bez pobierania rdzenia do głębokości 519 m w celu ominięcia strefy uskokowej;
- 13–23.01.2016 – wiercenie z pobieraniem rdzenia do głębokości 790 m, z krótką przerwą (15 h) spowodowaną zakleszczeniem rury w ścianie odwiertu. Odwiert na tym odcinku jest bardzo stabilny, a odsetek pobranego rdzenia to aż 89%, co napawa optymizmem na przyszłość. W tym interwale wydobyto też rekordowej długości (285 cm) nie-naruszony rdzeń;
- 23–26.01.2016 – pomiary geofizyczne otworu i wydobywanie jednego z komponentów systemu *mechanical bit release* (MBR), który wpadł do otworu podczas operacji wyciągania aparatury geofizycznej. MBR to mechanizm służący do uwalniania wiertła z otworu w trakcie wyciągania rur na powierzchnię;
- 27–30.01.2016 – tranzyt na Mauritius.

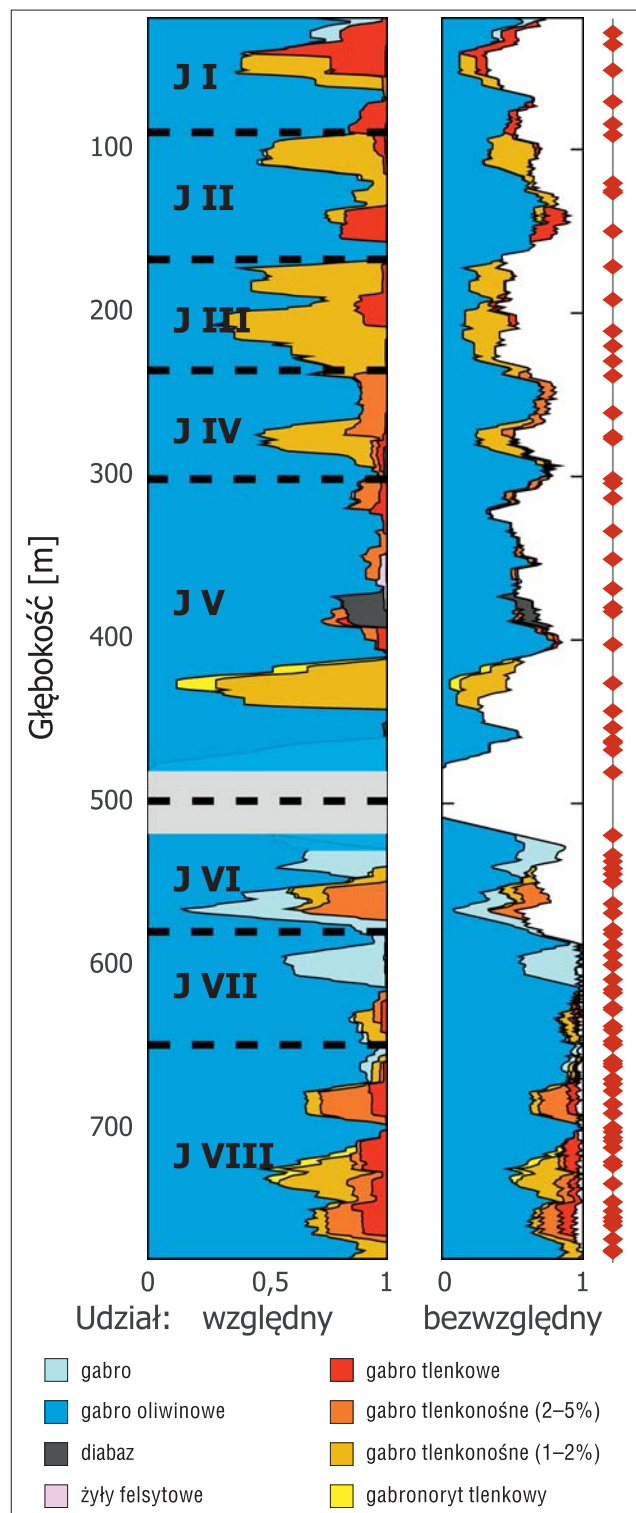


Ryc. 2. Mapa batymetryczna przedstawiająca płasko ściętą platformę Atlantis Bank na głębokości około 700–800 m p.p.m. Niebieska kropka symbolizuje położenie obecnego otworu U1473A. Czarne kropki reprezentują dwa poprzednie otwory wywiercone w Atlantis Bank. Wkładka pokazuje lokalizację Atlantis Bank wzdłuż śródoceanicznego Grzbietu Zachodnioindyjskiego (SWIR) na Oceanie Indyjskim. CIR – Grzbiet Środkowioindyjski, SEIR – Grzbiet Wschodnioindyjski

### NAJWAŻNIEJSZE WYNIKI

U1473A jest najdłuższym odwiertem wywierconym w trakcie jednej ekspedycji w historii wypraw JOIDES Resolution i trzecim najdłuższym odwiertem w dolnej skorupie oceanicznej. Bardzo wysoki odsetek uzyskanego rdzenia w stosunku do postępu odwiertu w obrębie dolnych 200 m (96%) skłania do optymizmu przy planowaniu kolejnych ekspedycji, świadcząc o stabilności dolnej części otworu, i zapowiadając dobre warunki wiertnicze w formacjach skalnych poniżej otworu. Pobrany rdzeń wiertniczy o długości 469 m i średnicy 6 cm będzie badany przez kilkudziesięciu naukowców z kilkunastu krajów świata pod kątem petrologii, geochemii, mikrobiologii, a także właściwości fizycznych, geofizycznych i magnetycznych. Wstępne badania skał zostały wykonane już na statku. Poniżej prezentujemy wyniki tych badań, podzielone na siedem kategorii: petrologia skał magmowych, geochemia, petrologia skał metamorficznych, geologia strukturalna, paleomagnetyzm, geofizyka i mikrobiologia.

**Petrologia skał magmowych.** Zgodnie z przewidywaniami skały gabrowe dominują w całym otworze. Jedynym wyjątkiem były nieliczne diabazy oraz żyły felsytowe, które stanowią 1,5% wszystkich pozyskanych skał. Wśród skał gabrowych przeważały gabra oliwinowe (76,5% wszystkich skał), a w dalszej kolejności gabra właściwe 14,6% i gabra tlenkowe/tlenkonośne (>2% zawartości tlenków; 7,4%). Zawartość tlenków maleje wraz z głębokością, z wyjątkiem ostatnich 650 m (ryc. 3). W tym dolnym odcinku odwiertu



Ryc. 3. Litostratygrafia otworu U1473 (Dick i in., 2016). Względne zawartości skał są uśrednione z 20 mb. Lewa kolumna przedstawia względny, a prawa bezwzględny udział skał w wywierconym materiale. Stopa odzyskanego materiału (*recovery rate*) wyniosła tylko ok. 45% w górnej części otworu i blisko 100% w dolnej części. Trzydziestometrowy interwał w środkowej części był wiercony bez pobierania rdzenia. Na podstawie zmian w litologii wyróżniono osiem jednostek magmowych (J I–J VIII). W litologii przeważa gabra oliwinowe. Gabra właściwe i gabra tlenkonośne o różnej zawartości tlenków są podrzędne, ale występują w obrębie całego otworu. Diabazy są obecne lokalnie w postaci żył magmowych. Oś po prawej stronie przedstawia dystrybucję próbek pobranych do badań poekspedycyjnych w Polsce

tlenki współwystępowały z amfibolami i siarczkami, przede wszystkim pirotynem i chalkopirytem. Przypuszcza się, że ta parageneza jest związana z perkolacją późnych stopów magmowych.

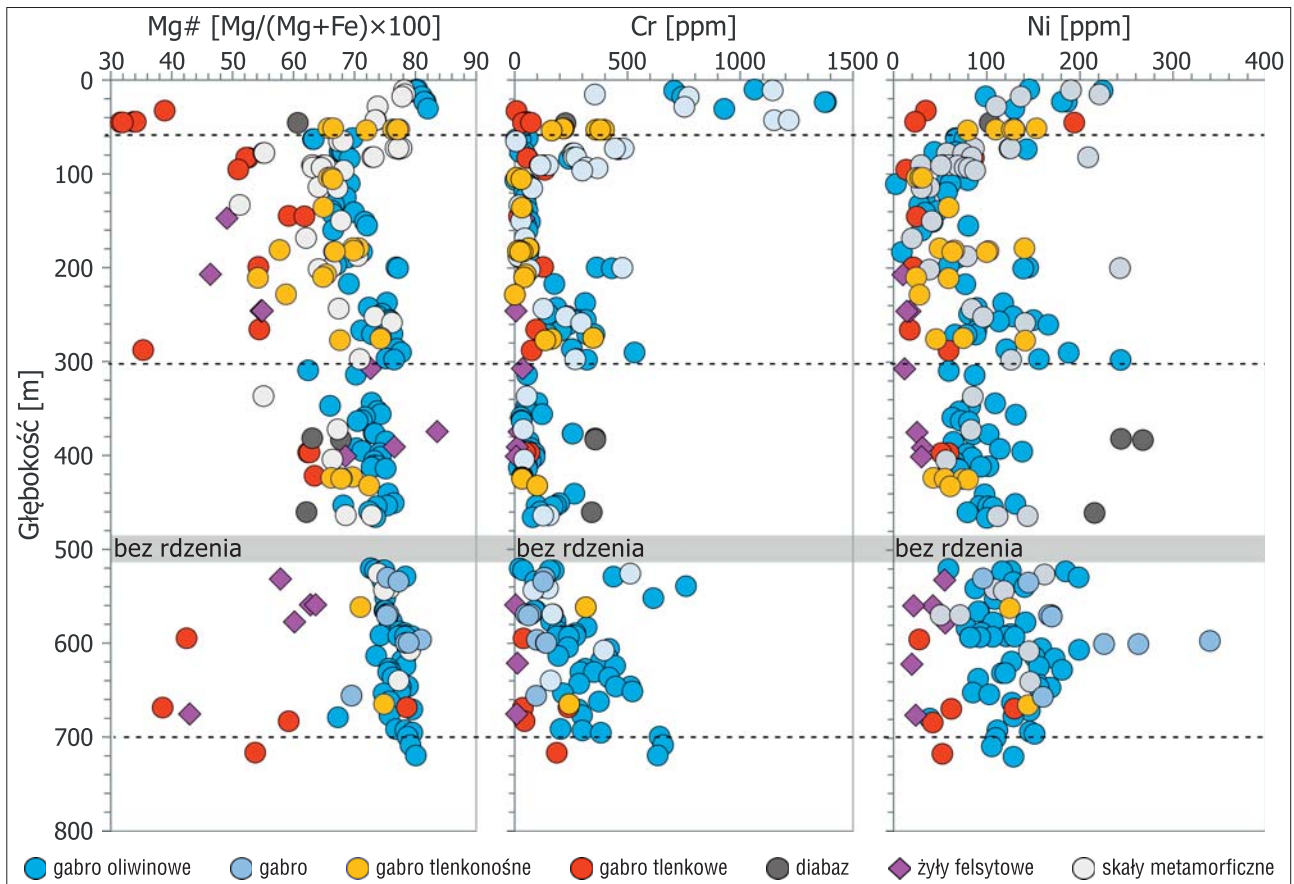
**Geochemia.** Średnia liczba magnezowa ( $Mg\# = 100 \cdot Mg / (Mg + Fe)$ ), która jest wskaźnikiem dyferencjacji magmy, wynosi 71, nie odbiegając znacząco od średniej uzyskanej dla poprzedniego otworu, 735B.  $Mg\#$  zawiera się w przedziale 66–81 i koreluje z innymi wskaźnikami dyferencjacji, np. zawartością Ni i Cr (ryc. 4). Wszystkie trzy wskaźniki wykazują wyraźne trendy malejące, na podstawie których można wydzielić co najmniej dwa duże plutony magmowe rozdzielone na granicy 300 m. W dolnym plutonie  $Mg\#$  maleje od 80 w dole otworu do 69 na 300 m. Obserwuje się spadek zawartości Ni od 140 do 80 ppm, i Cr od 750 do 80 ppm. Powyżej 300 m, gdzie prawdopodobnie zaczyna się nowy pluton, następuje gwałtowny skok wartości  $Mg\#$ , Ni i Cr odpowiednio do 78, 220 i 550 ppm. Powyżej wszystkie trzy wskaźniki spadają stopniowo do głębokości 60 m, gdzie może kończyć się drugi pluton, osiągając odpowiednio 68, 50 i 50 ppm. Gwałtowny skok wartości powyżej 60 m jest na razie niewiadomą. Może wiązać się z rozpoczęciem nowego plutonu, a może być spowodowany intensywną cyrkulacją hydrotermalną przy powierzchni.

Petrologia skał metamorficznych. Zawartość wody w skałach, która waha się od 0,3 do 8% jest dużo wyższa niż

oczekiwana w świeżych skałach magmowych. Oznacza to silną infiltrację wód morskich przez skorupę. Zawartość wody maleje wraz z głębokością. Żyły felsytowe często zawierają wtórne siarczki i minerały ilaste. Powszechna jest także rekryształizacja plagioklastu do albitu i czasami kwarcu, dowodząca że żyły te stanowiły drogi przepływu dla znacznych objętości wód hydrotermalnych. Podobnie jak w odwiertach 735B i 1105A powszechne są żyły amfibolowe w górnych 200 m otworu.

**Geologia strukturalna.** Zidentyfikowano siedem stref uskokowych skoncentrowanych w górnej i środkowej części otworu, z największą z nich pomiędzy 411 i 469 m. Tworzą one ogromny, o skali niespotykanej wcześniej w skorupie oceanicznej, system uskokowy (500 m miąższości) wywołany prawdopodobnie wypiętrzaniem się Atlantis Bank OCC wzdłuż *detachment fault*. Strefy uskokowe korespondują z niską stopą wydobytego rdzenia, szybszą penetracją oraz często z problemami technicznymi w trakcie wiercenia. Średnica otworu mierzona kaliperem jest w tych strefach powiększona. Największa strefa uskokowa jest wypełniona brekcją z dużą ilością chlorytu i żył węglanowych. Obniżona temperatura na tym odcinku świadczy o tym, że uskok jest jeszcze aktywny hydrologicznie.

**Paleomagnetyzm.** Jednym z celów ekspedycji było przewiercenie się przez granicę między magnetozoną odwróconą C5r.3r i magnetozoną normalną C5r.2n. Przypuszcza się bowiem, że granica ta nie jest pionowa, ale



**Ryc. 4.** Zmiany w składzie chemicznym skał w funkcji głębokości. Liczba magnezowa ( $Mg\#$ ), zawartość Ni oraz Cr wykazują trendy spadkowe przez niemal całą długość otworu. Główne nieciągłości obserwowalne są na ok. 60, 300 i 700 m. Skały metamorficzne to gabra oliwinowezmetamorfizowane w wyniku cyrkulacji hydrotermalnej. Nie pobierano próbek do analizy chemicznej z dolnych 70 m otworu, z uwagi na pięciodniowy okres czasu potrzebny na przygotowanie próbek i analizy oraz niemożność wykonywania analiz chemicznych w trakcie tranzytu (na podstawie Dicka i in., 2016, zmodyfikowane)

nachylona pod kątem około 25° (Allerton & Tivey, 2001). Do dna odwiertu na głębokości 790 m na wspomnianą granicę nie natrafiono. Wszystkie skały magmowe wykazują namagnesowanie odwrócone. Niemniej jednak, kilka wąskich stref o namagnesowaniu normalnym odkryto w zmetamorfizowanych skałach gabrowych z dolnej części otworu. Ich obecność w obrębie magnetozyony odwróconej świadczy o remagnetyzacji tych skał w późniejszej magnetozyonie normalnej C5r.2n. Choć trudno określić dokładny czas metamorfizmu na podstawie tych danych, to obecność stref o namagnesowaniu normalnym sugeruje, że granica magnetozyony C5r.3r i C5r.2n może znajdować się blisko dna otworu.

**Pomiary petrofizyczne.** Średnia gęstość zmierzonych skał wynosi 2,98 g/cm<sup>3</sup>, średnia porowatość 0,6%, a średnia prędkość rozchodzenia się podłużnych fal sejsmicznych 6734 m/s.

**Mikrobiologia.** Adenozynotrójfosforan (ATP), który wskazuje na istnienie życia, został wykryty w kilkunastu z 68 badanych próbek. W trakcie rejsu wyhodowano z tych próbek różne typy organizmów, w tym bakterie, archeany i grzyby. Szczegółowe analizy, głównie DNA i RNA, zostaną wykonane na lądzie.

#### KOLEJNE FAZY PROJEKTU

Przyszłość projektu może być rozpatrywana w trzech perspektywach: krótkoterminowej z zaplanowanym harmonogramem, średnioterminowej z nierozpisanym harmonogramem, ale zapewnionymi środkami finansowymi, oraz długoterminowej bez określonego harmonogramu i zapewnionych środków finansowych.

Perspektywa krótkoterminowa – ekspedycja inżynierska 362T (Kapsztad–Colombo, 4.07–6.08.2016)<sup>7</sup>:

a) dodatkowe pomiary geofizyczne otworu. Jednym z nich będzie pomiar szerokości otworu, w celu zbadania czy zachował on swój kształt. Istotny będzie również pomiar temperatury, żeby zweryfikować zgodność z rzeczywistością pomiaru wykonany w trakcie Ekspedycji 360 (skały mogły ulec ogrzaniu w wyniku wiercenia, wykazując sztucznie zawyżoną temperaturę);

b) wydobycie metalowej części MBR, która wpadła do otworu pod koniec Ekspedycji 360;

c) zacementowanie problematycznej niestabilnej części otworu między 164 i 574 m;

d) przewiercenie cementu;

e) pogłębienie otworu do głębokości 795 m bez pobierania rdzenia;

f) pogłębienie otworu z pobieraniem rdzenia tak długo jak pozwoli na to czas, ale nie więcej niż do 890 m.

Perspektywa średnioterminowa – druga ekspedycja naukowa z Joides Resolution, prawdopodobnie w 2018 r. lub 2019 r. Pogłębienie otworu do głębokości 2300 m (ryc. 1, SloMo Faza I, etap II).

Perspektywa długoterminowa – druga faza projektu z wykorzystaniem japońskiego statku Chikyu, prawdopodobnie w latach 2020–2025. W tej fazie projektu jest planowane pogłębienie otworu do głębokości 6 km (ryc. 1, SloMo Faza II).



**Ryc. 5.** Fotografia archiwalnej części rdzenia wiertniczego pochodząca z interwału wzbogaconego w siarczki (por. tekst). Jedna z próbek (U1473A-80R-7-W 112/115-CIAZ) do badań poekspedycyjnych została pobrana z tego miejsca. Dominującym siarczkiem jest pirotyt (brązowe zabarwienie), a uzupełniającym chalkopiryty (żółte zabarwienie)

#### ZAINTERESOWANIE W MEDIACH

Projekt odwiertu do płaszcza przez powierzchnię nieciągłości Moho wzbudził znaczące zainteresowanie w mediach. Na świecie ukazało się kilkadziesiąt artykułów prasowych (w tym w BBC i Nature), cztery transmisje telewizyjne i cztery wywiady radiowe. W Polsce opublikowano dwa artykuły w Gazecie Wyborczej („Podróż do wnętrza Ziemi”, 09.12.2015 i „Przedziurawią dno oceanu”, 30.03.2016) oraz audycję w radiu RDC („Naukowcy chcą dowiercić się do płaszcza Ziemi. Są już na głębokości 800 m”, 7.04.2016).

#### BADANIA POEKSPEDYCYJNE

Każdy z 30 naukowców uczestniczących w ekspedycji pobrał próbki skalne do badań specjalistycznych. W Polsce punkt ciężkości zostanie położony na badanie cyrkulacji metali chalkofilnych oraz siarki w dolnej skorupie oceanicznej, ze szczególnym naciskiem na interwał bogaty w duże siarczki żelaza (pirotyt) i miedzi (chalkopiryty) między 615 a 730 m (ryc. 5). W tym celu pobrano 100 próbek reprezentatywnych dla całej długości odwiertu (ryc. 3). Jest planowane wykorzystanie następujących metod badawczych:

– fluorescencja rentgenowska (XRF) do określenia zawartości makroskładników w całych próbkach;

– spektrometr masowy z indukcyjnie sprzężoną plazmą (ICPMS) oraz instrumentalna neutronowa analiza aktywacyjna (INAA) do określenia zawartości kluczowych pierwiastków śladowych w całych próbkach;

– analizator CS do określenia zawartości siarki w całych próbkach

– gazowy spektrometr mas do określenia składu izotopowego siarki;

– analiza mikroskopowa w świetle przechodzącym i odbitym;

– mikrosonda elektronowa (EMPA) do określenia pierwiastków głównych w minerałach;

– ablacja laserowa (LA) z ICPMS w do określenia zawartości pierwiastków chalkofilnych oraz składu izotopowego Cu i Fe w siarczkiach i innych minerałach.

<sup>7</sup> Ekspedycja odbyła się w zaplanowanym terminie. Raporty z przebiegu ekspedycji znajdują się na stronach [www.iodp.tamu.edu](http://www.iodp.tamu.edu).

## WNIOSKI

Mimo licznych problemów, w tym tygodnia poświęconego na ewakuację medyczną, ekspedycja zakończyła się zadawalającym sukcesem. Niemal 800-metrowy odwiert i realizowana w tym roku dodatkowa ekspedycja inżynierska w celu jego stabilizacji, dają nadzieję na przewiercenie się przez granicę skorupy i płaszcz już podczas drugiej ekspedycji naukowej w ciągu najbliższych trzech lat. Cieszy również duże zainteresowanie projektem mediów na świecie i w Polsce oraz możliwość prowadzenia badań poekspedycyjnych w naszym kraju, trudnych do pozyskania skałach dolnej skorupy oceanicznej pobranych *in situ*.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2013–2017 jako projekt badawczy w ramach programu pod nazwą „Diamentowy Grant” (nr DI2012 2057 42). Pierwszy autor dziękuje Państwowemu Instytutowi Geologicznemu – Państwowemu Instytutowi Badawczemu (PIG-PIB) za wprowadzenie Polski w struktury IODP (International Ocean Discovery Program), który jest największą międzynarodową inicjatywą prowadzącą głębokie wiercenia badawcze w litosferze oceanicznej. Udział polskich badaczy w ekspedycjach IODP nie byłby możliwy bez wkładu finansowego i zaangażowania PIG-PIB. Dziękuje również IODP Koordynationsbüro w Niemczech za pokrycie kosztów podróży na Sri Lankę i z Mauritiusu. Specjalne podziękowania należą się prof. A. Muszyńskiemu za pomoc w redakcji tekstu oraz prof. S. Uścincowiczowi za wspieranie polskich naukowców ubiegających się o udział w ekspedycjach IODP. Wszyscy autorzy dziękują kapitanowi T. Skinnerowi i załodze statku złożonej z techników, inżynierów, marynarzy, kucharzy i stewardów, którzy pracowali przez dwa miesiące przez 84 godz. w tygodniu dla osiągnięcia wspólnego celu.

## LITERATURA

- ALLERTON S. & TIVEY M.A. 2001 – Magnetic polarity structure of the lower oceanic crust. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 423–426. Doi:10.1029/2000GL008493.
- BAINES A.G., CHEADLE M.J., DICK H.J.B., SCHEIRERA H., JOHN B.E., KUSZNIR N.J. & MATSUMOTO T. 2003 – Mechanism for generating the anomalous uplift of oceanic core complexes: Atlantis Bank, southwest Indian Ridge. *Geology*, 31: 1105–1108. Doi:10.1130/G19829.1.
- BAINES G., CHEADLE M.J., DICK H.J.B., SCHEIRER A.H., JOHN B.E., KUSZNIR N.J. & MATSUMOTO T. 2007 – Evolution of the Southwest Indian ridge from 55°45'E to 62°E: Changes in plate-boundary geometry since 26 Ma. *Geochem., Geophys., Geosystems*, 8. Doi:10.1029/2006GC001559.
- BAINES A.G., CHEADLE M.J., JOHN B.E., GRIMES C.B., SCHWARTZ J.J. & WOODEN J.L. 2009 – SHRIMP Pb/U zircon ages constrain gabbroic crustal accretion at Atlantis Bank on the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 287: 540–550. Doi:10.1016/j.epsl.2009.09.002.
- CANNAT M. 1996 – How thick is the magmatic crust at slow spreading oceanic ridges? Melt Migration in the Axial Lithosphere of Slow Spreading Ridges?: Constraints from Ultramafic and Gabbroic Samples. *J. Geophys. Res.*, 101: 2847–2857.
- CIAZELA J., KOEPKE J., DICK H.J.B. & MUSZYŃSKI A. 2015 – Mantle rock exposures at oceanic core complexes along mid-ocean ridges. *Geologos*, 4: 207–231. Doi:10.1515/ilogos-20315-0017.
- DICK H.J.B., NATLAND J.H., ALT J.C., BACH W., BIDEAU D., GEE J.S., HAGGAS S., HERTOGEN J.G.H., HIRTH G., HOLM P.M., ILDEFONSE B., ITURRINO G.J., JOHN B.E., KELLEY S., KIKAWA E., KINGDON A., LEROUX P.J., MAEDA J., MEYER P.S., MILLER D.J., NASLUND H.R., NIU Y.L., ROBINSON P.T., SNOW J., STEPHEN R.A., TRIMBY P.W., WORM H.U. & YOSHINOBU A. 2000 – A long in situ section of the lower ocean crust: Results of ODP Leg 176 drilling at the Southwest Indian Ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 179: 31–51.
- DICK H.J.B., NATLAND J.H. & ILDEFONSE B. 2006 – Past and future impact of deep drilling in the Oceanic Crust and Mantle. *Oceanography*, 19: 72–80.
- DICK H.J.B., MACLEOD C.J. & BLUM P. 2015 – Southwest Indian Ridge Lower Crust and Moho. The nature of the lower crust and Moho at slower spreading ridges (SloMo-Leg 1). *Int. Ocean Drill. Progr. Sci. Prospect.*, 360.
- DICK H.J.B., MACLEOD C.J., BLUM P. & THE EXPEDITION 360 SCIENTISTS 2016 – Expedition 360 Preliminary report Southwest Indian Ridge lower crust and Moho The nature of the lower crust and Moho at slower spreading ridges ( SloMo-Leg 1), International Ocean Discovery Program. <http://dx.doi.org/10.14379/iodp.pr.360.2016>.
- JOHN B.E., FOSTER D.A., MURPHY J.M., CHEADLE M.J., BAINES A.G., FANNING C.M. & COPELAND P. 2004 – Determining the cooling history of in situ lower oceanic crust-Atlantis Bank, SW Indian Ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 222: 145–160. Doi:10.1016/j.epsl.2004.02.014.
- KLEIN E.M. 2003 – Geochemistry of the igneous ocean crust. [W:] Rudnick R.L. (red.), *Treatise on Geochemistry*, tom 3, The Crust. Elsevier, Amsterdam: 433–463. Doi:10.1016/B0-08-043751-6/03030-9.
- MACLEOD C.J., DICK H.J.B., ALLERTON S., ROBINSON P.T., COOGAN L.A., EDWARDS S.J., GALLEY A., GILLIS K.M., HIRTH G., HUNTER A.G., HUTCHINSON D., KVASSNES A.J., NATLAND J.H., SALISBURY M.H., SCHANDL E.S., STAKES D.S., THOMPSON G.M. & TIVEY M.A. 1998 – Geological mapping of slow-spread lower ocean crust: a deep-towed cideo and wireline rock drilling survey of Atlantis Bank (ODP Site 735, SWIR). *InterRidge News*, 7: 39–43.
- MILLER D.J. & CHRISTENSEN N.I. 1997 – Seismic velocities of lower crustal and upper mantle rocks from the slow-spreading ridge, south of the Kane transform zone (MARK). *Proc. Ocean Drill. Program, Sci. Results*, 153: 437–454.
- MULLER M.R. 1997 – Thin crust beneath ocean drilling program borehole 735B at the Southwest Indian Ridge? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148: 93–107.
- NICOLAS A. 1995 – Die ozeanische Rücken. Gebirge unter dem Meer. Springer, Berlin. Doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- PETTIGREW T.L., CASEY J.F., MILLER D.J. & SHIPBOARD SCIENTIFIC PARTY 1999 – Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, 179. College Station, TX.
- ROBINSON P.T., VON HERZEN R. & SHIPBOARD SCIENTIFIC PARTY 1989 – Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, 118. College Station, TX.
- SCHWARTZ J.J., JOHN B.E., CHEADLE M.J., WOODEN J.L., MAZDAB F., SWAPP S. & GRIMES B. 2010 – Dissolution-reprecipitation of igneous zircon in mid-ocean ridge gabbro, Atlantis Bank, Southwest Indian Ridge. *Chem. Geol.*, 274: 68–81. Doi:10.1016/j.chemgeo.2010.03.017.
- TEAGLE D. & ILDEFONSE B. 2011 – Journey to the mantle of the Earth. *Nature*, 471: 437–439. Doi:10.1038/471437a.

Praca wpłynęła do redakcji 23.05.2016 r.  
Akceptowano do druku 24.05.2016 r.