

UDK 551.435.9 (497.5)

Primljeno (Received): 20.12.1994

Prihvaćeno (Accepted): 25.3.1995.

Izvorni znanstveni članak

Original Scientific Paper

## MORA OKO ANTARKTIKE

### REZULTATI KLIMAGEOMORFOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA

JOSIP RIĐANOVIĆ

Suvremena marinsko-geoznanstvena istraživanja obavljena su bušenjem kore i praćenjem kretanja izotopa kisika na planktonskim foraminiferama u morima oko Antarktike. Bušenja su izvršena s istraživačkih brodova Golmar Challenger (1973. i 1974.) i Joides Resolution (1987.) prema zacrtanom znanstvenom programu. Istaknuta je važnost klima-geomorfoloških rezultata za bolje i točnije upoznavanje mora polarnih krajeva na južnoj hemisferi.

#### **THE SEAS SURROUNDING ANTARCTICA**

##### **Results of Climatic-Geomorphological Researches**

*Modern submarine scientific researches have been performed by drilling of the Earth crust (i.e. the upper part of lithosphere) and by observing the oxygen isotopes exchange at plankton foraminiferae associations in the seas surrounding Antarctica. Drillings were performed by the research ships "Golmar Challenger" in 1973 and 1974, as well as by "Joides Resolution" in 1987, in accordance with the previously defined programme. As result, there have been identified some climatic-geomorphological factors and perceived their importance for better understanding of polar seas in southern hemisphere.*

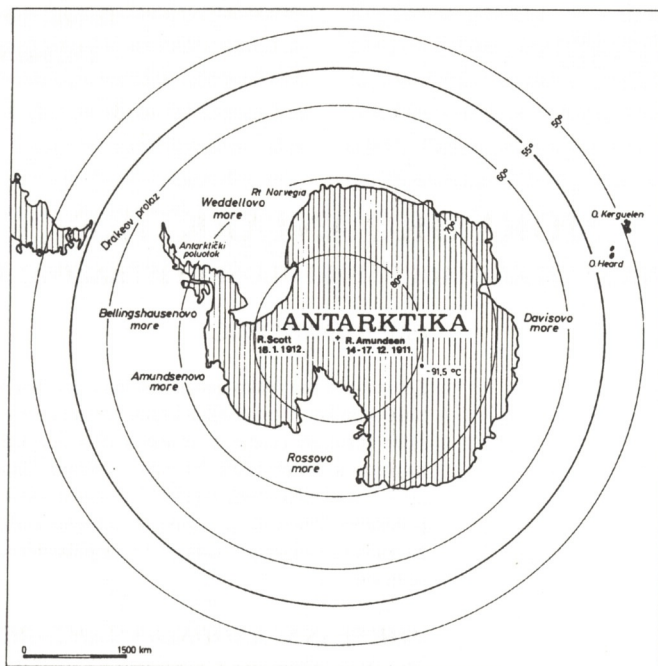
#### **Uvod**

Oko Antarktike su: Weddelovo, Davisovo, Rossovo, Amundsenovo i Bellingshausenovo more (sl.1).

Mora oko Antarktike razlikuju se znatno od ostalih dijelova svjetskog mora po specifičnim svojstvima i drukčijim društveno-gospodarskim značajkama koje su uvjetovane geografskim položajem i razvojnim procesima. Ta su mora pod izravnim i stalnim utjecajem najvećeg ledenog pokrova na Zemlji. Led utječe na snižavanje temperature okolnog mora i zraka, smanjuje slanost mora

daleko ispod prosječnih vrijednosti, povećava prijelaz kisika iz atmosfere u hidrosferu, uvjetujući bogatstvo biomase (planktona) i specifične uvjete života.

Određivanje mora polarnih krajeva vrši se na više načina (STÄBLEIN, 1983, 1983a). Važan geološki kriterij trebala bi predstavljati Antarktička ploča. Ali ona se prostire u srednjem Indijskom i istočnom dijelu Velikog oceana iznad 35°S; zalazi u pojas subtropa! Prema raširenosti leda "prirodna" međa vrlo je promjenljiva jer ovisi od godišnjih doba. U



Slika 1. Mora oko Antarktike unutar 55°S

Fig. 1. The seas surrounding Antarctica encompassed by the latitude 55°S.

najtoplijem razdoblju ledeni bregovi prelaze 40°S! Prema Antarktičkom ugovoru povučena je sjeverna granica za južnu polarnu regiju sa 60°S. Za određivanje polarnih krajeva pokazala se svrhovitom kompleksna geografska metoda na temelju razmatranja 10 kriterija (HAMELIN, 1968), posebice za obilježavanje mora polarnih krajeva na južnoj hemisferi (CAILLEUX, 1972).

Kao kompromis za određivanje sjeverne granice mora polarnih krajeva na južnoj hemisferi najbolje bi odgovarao kriterij 55°S. Taj kriterij podudara se ponajprije sa smjerom stalnih morskih struja koje su uvjetovane prevladavajućim zapadnim vjetrovima, Antarktičkim prstenom struja, zatim s Antarktičkom kovergencijom (DEACON, 1937), Antarktičkim ekosustavom (DRESCHER, 1983) i osobito s mjerilima

polarnih vrijednosti prema kompleksnoj geografskoj metodi (CAILLEUX, 1972). *Kompleksna geografska metoda na osnovi mjerila polarnih vrijednosti najpotpunije objedinjava različite utjecaje prirode i društveno-gospodarskih zahvata u suvremenim procesima i najprihvatljivija je za obilježavanje mora u polarnim krajevima.*

**Mora oko Antarktike unutar 55°S (južne geografske širine) najsvrhovitiji je naziv za mora polarnih krajeva na južnoj hemisferi (RIDANOVIĆ, 1993).**

Marinsko-geoznanstvena problematika o polarnim krajevima, posebice o južnoj polarnoj regiji, na hrvatskom jeziku dosta je oskudna. U svjetskoj literaturi izašlo je obilje zanimljivih članaka, više stručnih rasprava i dva nadasve značajna projekta koja zaslužuju posebnu geoznanstvenu pozornost. To su:

"Deep Sea Drilling Project" (DSDP) s brodom Glomar Challenger i "Ocean Drilling Program" (ODP) s istraživačkim brodom Joides Resolution. U nastavku predočit će se ponajviše rezultati tih istraživanja sa željom za suvremenije, bolje i točnije upoznavanje mora polarnih krajeva na južnoj hemisferi.

Iz provedenih marinskih istraživanja u morima oko Antarktike, posebice uzduž ledenog pokrova Antarktike nameću se dva pitanja. To su: Klimatski razvitak Antarktičkog kraja prema paleoceanskoj analizi, to jest, rekonstrukciji odnosa mora i kopna u prošlosti, na temelju specifičnih ledenjačko-marinskih sedimentacijskih procesa izravno istraživanih u morima oko Antarktike i geotektonski razvitak cjelovitog Antarktičkog kraja u sklopu teorije o tektonici ploča uz pomoć geofizičkih metoda, seizmike, magnetizma i gravimetrije, kao i drugih specijalnosti suvremene geofizike.

### Klimatski razvitak Antarktičkog kraja

Povijest zaledivanja Antarktičkog kraja u širem smislu ili vremensko-prostorni slijed zaledenosti kopna Antarktike u užem smislu, može se pouzdanije objasniti suvremenim proučavanjem sedimentata dubokog mora.

Značajan napredak učinjen je bušenjem kore na dnu mora oko Antarktike u godinama 1973. i 1974. To je ostvareno u okviru projekta DSDP s brodom Glomar Challenger (sl.2).

Na temelju istraživanja izotopa kisika na planktonskim foraminiferama (jednostaničnim prabićima) iz Tasmanovog mora dokazano je da je ohlađivanje površinskog sloja mora oko Antarktike započelo u paleocenu i trajalo do eocena (KENNET i SHACKELTON, 1976). Nagla promjena krivulje izotopa na prijelazu eocena u oligocen izražena termohalinom (koja se i danas pojavljuje) objašnjava se prodorom ledene oceanske vode. Ustanovljeni skok izotopa



Slika 2. Bušotine u morima oko Antarktike  
Fig. 2. Drilling in the submarine area around Antarctica.



odgovara padu temperature površinskog sloja mora oko Antarktike od 3 do 5°C. Taj pad temperature mora dogodio se relativno brzo. Odatle bi se moglo zaključiti da se u tom razdoblju pojavila prvi put znatnija ledena kora u morima oko Antarktike. Koji je geološki događaj utjecao na to, nije jasno, ali otvaranje Tasmanovog prolaza između Australije i Antarktike prije 37-38 milijuna godina bilo je zasigurno od značaja.

Druga faza bušenja kore na dnu mora oko Antarktike započela je u siječnju godine 1987. To je bio nastavak projekta DSDP u okviru "Ocean Drilling Program" s istraživačkim brodom *Joides Resolution*. Sa znatno poboljšanom tehnikom bušenja i kvalitetnijim jezgrama izvršeno je osam bušotina tijekom 1. i 2. mjeseca godine 1987. u Weddellovom moru. Prva obrada podataka izbušenog materijala obavljena je na brodu, te je moguće podastri kratki uvid u kronologiju zbivanja Antarktičkog kraja za posljednjih 100-ak milijuna godina (FÜTTERER, 1988).

Planktonski mikrofosili i prašinsti sedimenti (prapor ili Löss upućuju na toplu i vlažnu klimu tijekom gornje krede pa sve do eocena. Analizom polena (peludi) ustanovljene su zajednice bukve odnosno listopadne vegetacije u doba eocena na sjevernom dijelu poluotoka Antarktike.

Značajnije zahladnjenje tijekom donjeg oligocena može se predpostaviti iz učestalijih povećanja biogene sedimentacije opala i promjene u taloženju prašinstih sedimenata. Ledom nošen materijal pojavio se prvi put u donjem oligocenu, to znači da je pred oko 35 milijuna godina morao postojati veći broj ledenjaka, zapravo već ledeni pokrov na kopnu Antarktike.

Osjetno povećanje morenskog materijala u srednjem miocenu objašnjava se pojačanom zaledenošću i egzarazijom zapadnog dijela Antarktike. Ledeni pokrov za-

padne Antarktike čini se da je mladi od gornjeg miocena, to jest, 10-5 milijuna godina. Iz vrlo različite strukture nanosa slijedi da je ledeni pokrov zapadne Antarktike u početnoj etapi razvitka bio podložan velikim promjenama.

Veća akumulacija iz povremenih mutnih struja na prijelazu miocena u pliocen (pred 5,3 milijuna godina) u Weddellovom moru dovodi se u svezu sa širenjem ledenog pokrova na zapadnu Antarktiku. Iz paleomagnetskih podataka može se zaključiti, da su sedimentacijske faze mutnih struja s vrlo velikim nanosima bile završene na početku pliocena (pred 4,8 milijuna godina). To bi ukazivalo na stabilizaciju ledenog pokrova zapadne Antarktike u tom vremenskom periodu.

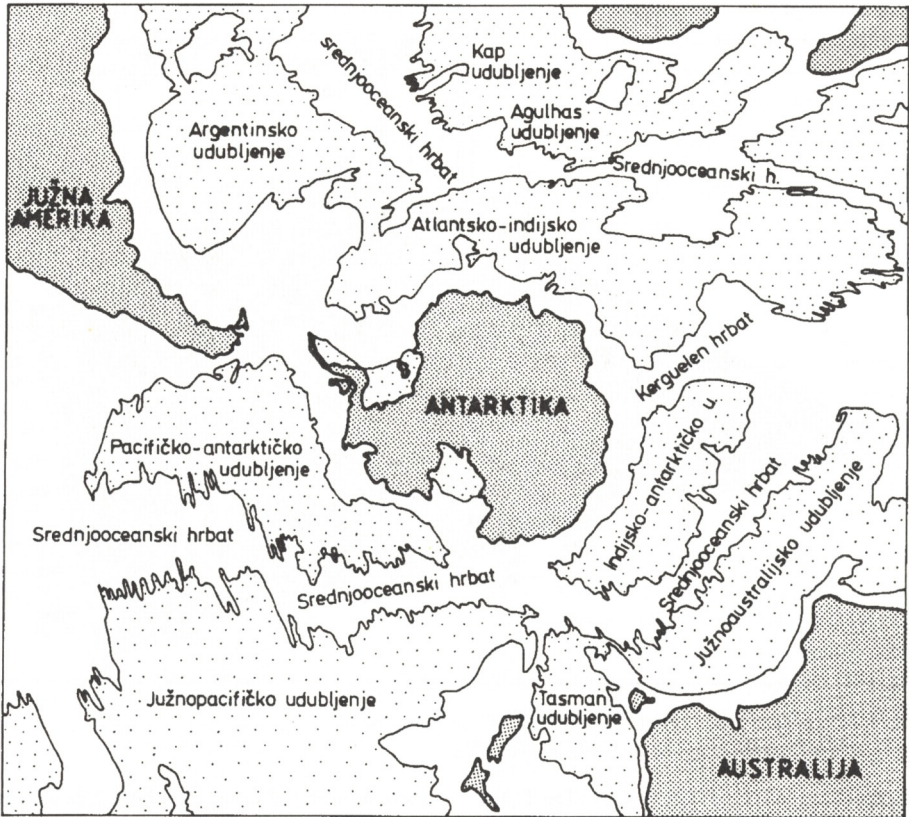
Za posljednje razdoblje od 2,4 milijuna godina u Weddellovom moru značajna je vrlo slaba sedimentacija i mali udio biogenog opala (dijatomeja) kao i slabo održanje mikrofosila. Iz toga slijedi da je nastupilo daljnje povećanje zaledenosti, to jest, novo proširenje leda prostorno i vremenski u morima oko Antarktike.

### Geotektonski razvitak Antarktičkog kraja

Makroreljefnu strukturu u podmorju Antarktike obilježavaju dubokomorska udubljenja omeđena srednjeoceanskim hrptovima. Ističu se tri prostrane reljefne cjeline s prosječnim dubinama oko 5000 m. To su: Atlantsko-indijsko, Indijsko-antarktičko i Velikooceansko-antarktičko udubljenje (sl.3). Između Atlantsko-indijskog i Indijsko-antarktičkog udubljenja izdiže se u smjeru sjever-jug velika struktura srednjeoceanskog hrpta Kerguelen, koja se pojavljuje iznad mora u istoimenom i obližnjem Heard otočju.

Antarktički kontinentski rub karakteriziraju brojni duboko usječeni kanjoni. Wegenerov kanjon ispred Rta Norvegia u istočnom





Slika 3. Makroreljefne cjeline u morima oko Antarktike

Fig. 3. Macro-morphological entities in submarine area around Antarctica.

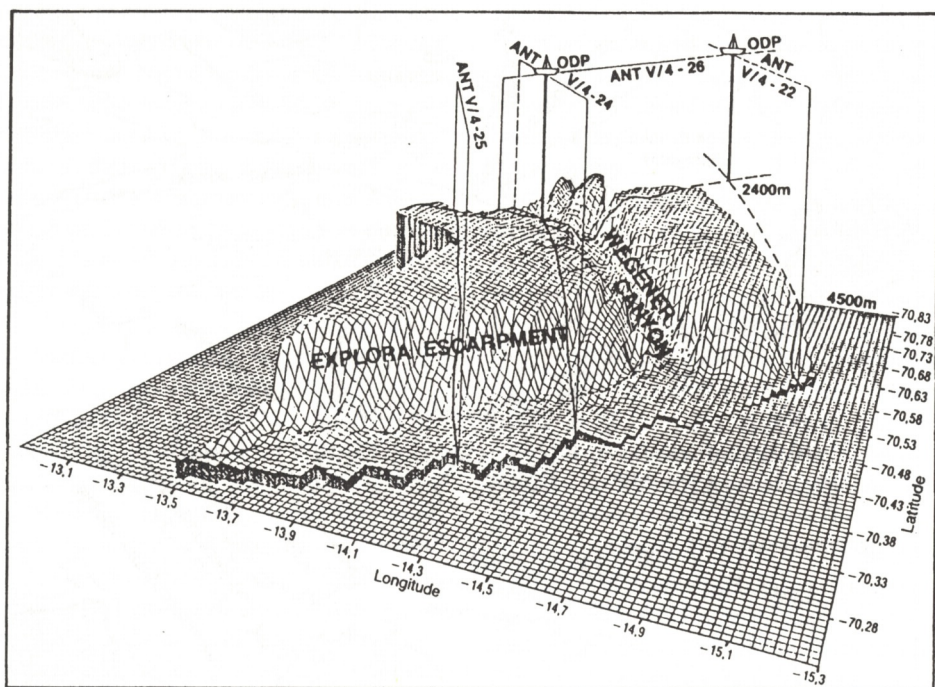
dijelu Weddelovog mora najizrazitiji je primjer (sl.4).

Pličak Antarktike obilježavaju vrlo specifične pojedinosti. Ponajprije istaknuti rub na srednjoj dubini od 500 m, što se dovodi u svezu s izostatičkim gibanjima kopna zbog opterećenja ledenog pokrova. Nadalje na pličaku su usječena različita korita koja su preizdubljena radom ledenjaka, primjerice ispod i ispred Filchner-Ronneovog i Amery ledenjaka.

Pličak duž istočne Antarktike, gdje nema leda, relativno je uzak. Nasuprot uzduž zapadne Antarktike pličak je općenito širi, a kod

Rossovog i Filchner-Ronneovog, obalnih ledenjaka, širi se više od 1000 km. Prema geofizičkim podacima to su nanosi glacijalnomarinskog podrijetla koji čine prostran i moćan sedimentacijski pokrov.

Geotektonski razvitak Antarktičkog kraja polazi od pretpostavke (činjenice) da je Antarktika dio jezgre prakontinenta Gondvane, najjužnijeg dijela južnog kopna Pangee (MILLER, 1983) od kojega su tijekom geološkog razdoblja nastala samostalna kopna, Južna Amerika, Afrika, Australija, Antarktika i Dekan, visočje u Indiji. Takvu su rekonstrukciju načinili na temelju sličnosti



Slika 4. Izometrijski prikaz reljefa u podmorju Weddelovog mora  
 Fig. 4. Isometric sketch of submarine relief in Weddell sea.

geostruktura WEGENER (1912) i Du TOIT (1937).

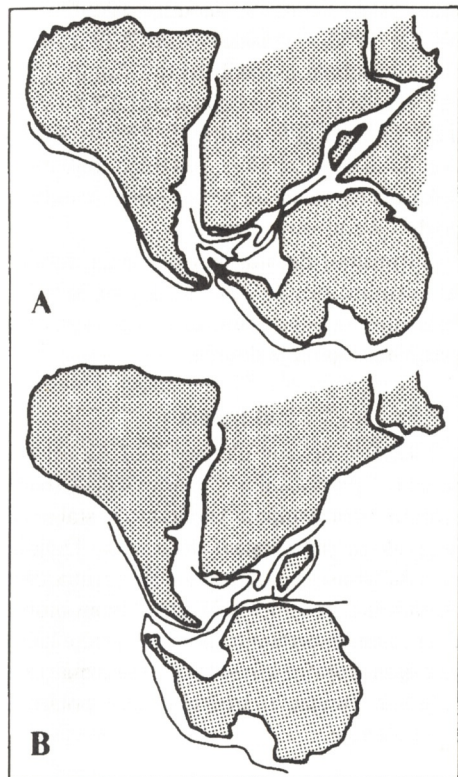
Fiziografska podjela južnog polarnog mora na velike prostorne cjeline dobro se uklapa u mehanizam globalne tektonike ploča. Aktivni rub gotovo u središtu pola Antarktike, jedne od sedam velikih ploča Zemlje, izgrađen je subdukcijskim procesima i omeđen srednjeoceanskim hrptovima između 30-60°W. Suvremena teorija o tektonici ploča "Sea-floor-spreading" dakle, mehanizam subdukcijskih procesa samo su potvrdili na mnogim detaljima reljefa točnost ranijih pretpostavki.

Veliki napredak postignut je suvremenim geofizičkim metodama istraživanja kada su određene paleomagnetske anomalije u stijenama oceanske kore. Ali u pojed-

nostima ima još dosta različitih štoviše proturiječnih shvaćanja. To se odnosi ponajprije na prvotni položaj Madagaskara između Afrike, Indije i Antarktike; posebice na položaj južnog dijela Južne Amerike prema poluotoku Antarktike. Promatrajući samo magnetske anomalije u Weddelovom moru mogao bi se izvesti zaključak o preklapanju (promjenljivom položaju) poluotoka Antarktike i visoravni u podmorju Falklandskog otočja. Ako se rekonstrukcija vrši na temelju geoloških istraživanja na terenu (in situ), onda se položaj poluotoka Antarktike određuje jugozapadno od južnog dijela Južne Amerike u Velikom oceanu (sl.5). To dovodi do razilaženja geoloških struktura između Afrike i istočne Antarktike. Teškoće nastaju zbog zanemarivanja činjenice, da je današnji oblik poluotoka



Antarktike mlada geološka struktura koja je nastala procesima razmicanja kore na dnu mora oko Antarktike.



Slika 5. Promjenjivi položaj Antarktičkog poluotoka

Fig. 5. Changing position of the Antarctic peninsula.

Mlada geofizička istraživanja rotacije (vrtnje) polova kod ponovnog uspostavljanja odnosa između Antarktike i Afrike prema Južnoj Americi pokazuju, na temelju paleomagnetskih silnica u oceanskoj kori, da je prije 64 milijuna godina položaj juga Južne Amerike prema Antarktičkom poluotoku bio

isti kao i danas. Također i ranije promjene su bile u skladu s procesima razgradnje primarnog i jedinstvenog kopna Gondvane.

Prije 119 milijuna godina morala se dogoditi ipak jedna veća vrtinja, oko  $10^{\circ}$  obrnuto od kazaljke na satu, između poluotoka Antarktike i istočne Antarktike. Takve geotektonske pretpostavke su u skladu s paleomagnetskim podacima u marinskim sedimentima i geološkim opažanjima na terenu.

**Weddelovo more na temelju dosadašnjih istraživanja čini se da je ključni prostor za rekonstrukciju zbivanja oko razgradnje Gondvane i objašnjenja sadašnjih reljefnih odnosa u morima oko Antarktike.**

Weddelovo more je inače vrlo teško pristupačan kraj jer je najzaleđeniji dio južnog polarnog mora. Usprkos tome tu je težište marinsko-geofizičkih istraživanja za Antarktiku i južnu polarnu regiju. Od oko 50 000 km seizmičkih profila snimljenih do godine 1988. u podmorju Antarktike 20 000 km je u Weddelovom moru (FÜTTERER, 1988).

U prostoru kontinentske kosine jugoistočnog Weddelovog mora ispod debelih i horizontalno staloženih sedimenata otkrivena je vjerojatno najstarija struktura, predpostavlja se u srednjoj juri, oceansko riftogeno udubljenje (HINZ i KRISTOFERSEN, 1987). Taj riftogeni žlijeb omeđen je prema sjeveru više od 1500 km dugom rasjednom zonom ponajprije "Andskim Exploratorom", a zatim dubokim Wegenerovim kanjonom (sl.4). Andski "Explorator" strmac vrlo je izrazit element reljefa u podmorju, predstavlja uzvisinu mjestimice više od 1000 m, vrlo visoku stepenicu na unutrašnjoj kontinentskoj kosini Weddelovog mora.

Geotektonski razvitak mora oko Antarktike započeo je u srednjoj juri, pred oko 180-160 milijuna godina (NORTON i SCLATER,

1979; LAWVER i ostali, 1985), kada se kopno Gondvane razgradilo u dva dijela: Zapadni s Južnom Amerikom i Afrikom i Istočni s Indijom, Antarktikom i Australijom. Kao ocean u zametku nastali su tada Weddelovo more, Mozambički kanal i Somalijsko udubljenje. Odvajanje Južne Amerike i Afrike uslijedilo je malo kasnije u gornjoj juri istodobno s daljnjim otvaranjem Weddelovog mora. Indija zajedno s Madagaskarom odvojila se od još zajedničkog bloka Antarktike i Australije u donjoj kredi gibajući se prema sjeveru stvarajući obrise Indijskog oceana. Relativno kasno tek, u eocenu, pred oko 55 milijuna godina odvojila se Australija od Antarktike. Povezano okoantarktičko dubokomorsko strujanje spriječavala je kopnena veza od Južne Amerike i poluotoka Antarktike. Istom u oligocenu, pred 30-25 milijuna godina, otvaranjem Drakeovog prolaza uspostavljeno je najveće i cjelovito kružno gibanje mora - Antarktički prsten morskih struja. (BARKER i BURREL, 1977).

Makrogeografska struktura mora oko Antarktike uglavnom je poznata. Za rekonstrukciju pojedinih dijelova reljefa nedostaju osnovni podaci. Na listu 5.18 "Opće batimetrijske karte mora oko Antarktike" (GEBICO)

mnogo je još "bijelih" površina!? Raspoložive podloge su očito još uvijek manjkave, ali i pogrešne. Primjerice u srednjem dijelu Weddelovog mora ucrtan je krivo podmorski hrbat "Islas Orcadas Seamounts" na duljini od 200 km i relativne visine više od 3000 m iznad okolnih dubokomorskih ravni? Antarktička ekspedicija s brodom Polarstern (ANT-IV/3) u doba južnog ljeta godine 1985/86 izvršila je dosada najsvremenije mjerenje dubina i dokazala da uopće ne postoji takva struktura po dnu Weddelovog mora!

Rezultati dosadašnjih mjerenja dubina su oskudni, štoviše netočni. Za buduća istraživanja bit će potrebno izvršiti nova znatno preciznija mjerenja dubina.

### Zaključak

Ledeni pokrov na zapadnoj Antarktici prema predočenim marinsko-geoznanstvenim istraživanjima kudikamo je stabilniji nego što se predpostavljalo dosada. Daljnja obrada izbušenog materijala u morima oko Antarktike, posebice u Weddelovom moru, dat će nam pouzdaniju i potpuniju sliku kako za rekonstrukciju klime tako i za poznavanje reljefnih odnosa u širokoj južnoj polarnoj regiji Zemlje.



## LITERATURA

1. BARKER, P.F. i BURREL (1977): The opening of the Drake Passage. *Marine Geology* 25. 15-34.
2. CAILLEUX, A. (1972): Indices polaires Antarctique. *Annale de Géographie*. 445. V-VI. 257-277. Paris.
3. DEACON, G.E.R. (1937): The hydrology of the Southern ocean. *Discovery Rep.* 15. Cambridge.
4. Deep Sea Drilling Project 29. (1975): Initial Reports. 743-756. Washington.
5. DRESCHER, H.E. (1983): Das antarktische marine ökosystem. *G.R.* 35. 3. 123-126. Braunschweig.
6. Du TOIT, A.L. (1937): Our wandering continents an hypothesis of continental drifting. Edinburgh.
7. FÜTTERER, D. (1988): Marine polare Geowissenschaften. *G.R.* 40. 3. 6-14. Braunschweig.
8. GEBCO (1983): General Bathymetric Chart of the Ocean. Blatt 5.18. 1:6000000. Canadian Hydrographic Service.
9. HAMELIN, L.E. (1968): Un indice circumpolaire. *Annales de géographie*. 442. 414-430. Quebec.
10. HARRISON, C.G.A., E.J. BARRON i W.W.HAY (1979): Mesozoic evolution of the Antarctic Peninsula and the southern Andes. *geology* 7. 374-378.
11. HINZ, K. i Y. KRISTOFFERSEN (1987): ANTARCTICA: Recent advances in the understanding of the continental shelf. *Geol. Jahrbuch E.* 37. 3-54.
12. KENNETT, J.P. i N.J. SHACKLETON (1976): Oxygen isotope evidence for the development of the psychrosphere 38. Myr. ago. *Nature* 260. 513-515.
13. LAWVER, L.A., J. SCLATER i L. MEINKE (1985): Mesozoic and Cenozoic reconstructions of the South Atlantic. *Tectonophysics* 114. 233-254.
14. MILLER, H. (1983): Der Antarktische Kontinent Kernstück von Gondwana. *G.R.* 35. 3. 101-103.
15. NORTON, S.O. i J.G. SCLATER (1979): A model for the evolution of Indian Ocean and the breakup of Gondwanaland. *Journal Geophys. Res.* 84. 6803-6830.
16. Ocean Drilling Program (1987): Glacial history of Antarctica. *Nature* 328. 115-116.
17. RIDANOVIĆ, J. (1993): HIDROGEOGRAFIJA, II. izdanje. Šk. knjiga. Zagreb.
18. STÄBLEIN, G. (1983). Abgrenzung der Polargebiete. *Antarktis und Arktis*. *G.R.* 35. 3. 98. Braunschweig.
19. STÄBLEIN, G. (1983a): Bedingungen und Möglichkeiten in den Polargebieten. 4-8. *Praxis Geographie* 11/1983. Braunschweig.
20. WEGENER, A. (1912): Die Entstehung der Kontinente. *Geol. Rundschau* 3. 276-292.

## Summary

### THE SEAS SURROUNDING ANTARCTICA

#### Results of Climatic-Geomorphological Researches

by

Josip Ridanović

Seas surrounding Antarctica, encompassed by the latitude 55°S, are typical polar seas of the south hemisphere (Ridanović, 1993).

Recent submarine researches started by sea-bottom drilling in Antarctic seas in 1973-74. The researches were included in scientific programme "Deep Sea Drilling", performed on the ship "Glomar Challenger".

Researches were continued in January 1987, when the special ship "Joides Resolution" was used for realisation of the programme "Ocean Drilling". Applying new techniques and improved cores, eight drillings were performed in the Weddell sea. Preliminary analysis of bored material was performed immediately on the ship. Thus, the first information on ice-cover spreading and duration in the Antarctic region for last 100 million years has been announced (Fütterer, 1988). The ice cover of Antarctica is assessed as stable but just entering the new spreading stage.

Geotectonical dynamics of the Antarctic area fits into well-known mechanism of global plate tectonics. Active rim of the Antarctic plate was created by subduction and is characterised by middle-oceanic ridges. In south-east part of the Weddell sea the oceanic riftogeneous depression was determined. This oldest regional geostructure was probably created in the Middle Jurassic (Hinz and

Kristoffersen, 1987). The depression is confined to the north by very long fractured zone, which is morphologically expressed partly as the Andean Explora Bluff, and partly as a deep Wegener Trench, situated off-shore the Cape Norvegia in the eastern part of Weddell sea (Fig.4).

Geotectonical development of the submarine area around Antarctica began in the Middle Jurassic (Norton and Sclater, 1979; Lawyer et al., 1985). The Gondwana mainland has been split into two parts; eastern and western. In that times were created both the Mozambique channel and the Weddell sea. Setting of South America apart of Africa occurred in the Upper Jurassic. India along with the island of Madagascar was shifted away in the Lower Cretaceous, when the first outskirts of Indian ocean have been formed. Australia was detached of Antarctica in the Eocene, some 55 million years ago. After the opening of Drake Passage in the Oligocene, 30-25 million years ago, the complete circulation of the seas around the Antarctica has been finally established.

Weddell sea presents the most important area for submarine scientific researches concerning decay of ancient Gondwana and also offers some explanations of submarine relief of the seas surrounding Antarctica.

**Dr. Josip Ridanović, redoviti profesor**  
Geografski odsjek PMF  
41000 ZAGREB, Hrvatska  
Marulićev trg 19