Prostorni položaj ofiolitskog kompleksa Demir Kapije (Makedonija) utvrđen na osnovu geomagnetskih podataka

DRAGANA D. PETROVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

VESNA V. CVETKOV, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

VLADICA D. CVETKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Originalni naučni rad

UDC: 552.3/5:550.838(497.7)

DOI: 10.5937/tehnika1602215P

Ofiolitski kompleks Demir Kapije predstavlja najveći i izdaniak ofiolita Istočne vardarske zone (IVZ) u Makedoniji. Da bi se odredio prostorni položaj ovog ofiolitskog kompleksa primenjene su matematičke transformacije na postojeće geomagnetske podatke sa područja Makedonije. Na osnovu sledećih postupaka: analitičkog produženja polja, izvoda ugla nagiba i kombinacije izvoda ugla nagiba i analitičkog produženja polja, zaključeno je da se ispod površine ofiolitski kompleks Demir Kapije nalazi ispod Srpsko-makedonske mase. Dobijeni rezultati, takođe, ukazuju da ofiolitski kompleks Demir Kapije ima oštru tektonsku granicu sa ostalim jedinicama, da se pruža u pravcu severoistok-jugozapad, da kao jedinstveno telo ima pad prema istoku - jugoistoku, kao i da ispod površine ima oblik ploče. Interpretirane granice ukazuju da ofioliti IVZ na području Makedonije pokazuju strm kontakt sa stenama Srpsko-makedonske mase u plitkim delovima, dok sa povećanjem dubine, ovaj kontakt dobija blaži pad.

Ključne reči: geomagnetski podaci, matematičke transformacije, Istočna vardarska zona, ofiolitski kompleks Demir Kapije

1. UVOD

Vardarska zona (VZ) je, u širem smislu, pojas šava između Drina-Ivanjica jedinice na zapadu i Srpsko-makedonske mase (SMM) na istoku. VZ se sastoji od ofiolita i različitih stena tzv. akrecionog melanja¹. Podeljena je na zapadnu, centralnu i istočnu zonu [1]. Tektonski položaj istog dela Vardarske zone je, za razliku od njenog zapadnog i centralnog dela, predmet neslaganja u naučnim krugovima.

Istočna vardarska zona (IVZ), obuhvata krajnji istočni (slika 1), uski pojas ofiolita, koji se severno prostire do Apusenskih planina u Rumuniji [2], [3], [4], [5], zatim se pruža kroz centralni deo Srbije gde uključuje ofiolite Ždraljice i Kuršumlije, da bi se prema jugu nastavio u Peonias zonu u Makedoniji i Grčkoj. Na prostoru Makedonije ofiolitski kompleksi

se mogu pratiti dolinom Vardara, od Skoplja do severne elije i makedonsko-grčke granice. Ofiolitski kompleks Demir Kapije je najveći i izdaniak Istočne vardarske zone u Makedoniji (slika 1 i 2). U okviru IVZ (Peonias zone), ofioliti Demir Kapije kartirani su dvojako, kao da su navučeni preko SMM [6], [7] ili kao da je preko njih tektonski smeštena SMM [8]. Postoje sugestije da je ovaj ofiolitski kompleks formiran otvaranjem izlaza na basenu iza Paikon luka [9], [10], i da je kasnije navučen zapadno na njega [11]. Sa druge strane, Robertson et al. u [12] tvrde da su ovi ofioliti originalno navučeni preko SMM i kasnije, tokom kasne jure, ponovo navučeni prema zapadu.

Ofiolitski kompleks Demir Kapije (OKDK) obuhvata sekvencu sačinjenu od pilou bazalta, nepravilnih tela dijabaza, dijabaznih dajkova i gabrova (slika 2). Mala, izolovana tela serpentinisanih peridotita predstavljena su dunitom i, podređeno, lerzolitom [7]. Granitoidi i graniti se prostiru od Štipa, preko Kone ke planine i dalje do oblasti Plauš-Furka (Fanos). Smatra se da su ovi graniti nastali tokom postkolizionne tektonike koja je usledila ubrzo nakon jurskih kolizionnih procesa odgovornih za smeštanje ofiolita [13]. Istočno od OKDK nalazi se Srpsko-makedonska masa koja je

¹Akrecioni melanj je haoti na sedimentna jedinica tektonskog porekla, nastala tokom procesa akrecije, odnosno prirastanja.

Adresa autora: Dragana Petrović, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, ul. ušina 7

Rad primljen: 28.12.2015.

Rad prihvaćen: 15.01.2016.

sa injena od prekambrijumskih i paleozojskih srednje-metamorfisanih magmatskih i sedimentnih stena predstavljenih gnajsevima, mikašistima, amfibolitima, zelenim škriljcima i mermerima. SMM je litološki veoma složena, pa je ovde prikaz pojednostavljen i sveden na zonu neposrednog kontakta sa IVZ.

Slika 1 - Uprošćena tektonska skica Makedonije i susednih oblasti, modifikovano iz [9]

Slika 2 - Uprošćena geološka karta istraživanog područja, modifikovano prema [14]

Cilj ovog istraživanja je da se utvrdi prostorni položaj ofiolita Demir Kapije na osnovu geomagnetskih podataka na području Makedonije. Definisanjem položaja ovog ofiolitskog kompleksa zaključeno je da ofioliti Demir Kapije padaju prema istoku-jugoistoku, odnosno da IVZ na području Makedonije leži ispod SMM.

2. METODOLOGIJA

Matematičke transformacije su primenjene na anomalijско polje vertikalne komponente geomagnetskog polja (GMP) u cilju definisanja prostornog položaja OKDK, odnosno izdvajanja "željenih" odziva iz ukupnog signala. Prilikom izdvajanja odziva iz ukupnog signala može se govoriti o uzrocnima anomalija. Izgled anomalije u profilu i u planu ukazuje na dubinu i horizontalno prostiranje uzrocnika anomalije. Pli i uzrocnici imaju odziv anomalija sa manjim horizontalnim rasprostranjenjem, ali sa izraženim gradijentima, dok uzrocnici na većim dubinama imaju anomalije sa širokim rasprostranjenjem i malim gradijentima. Sve transformacije predstavljaju svojevrsno filtriranje anomalijских vrednosti sirovih podataka u domenu određenih frekvencija. U radu su korišćeni podaci vertikalne² (Z) komponente geomagnetskog polja dobijene na osnovu premera I reda SFRJ u periodu od 1958. do 1960. godine. Vrednosti su svedene na epohu 1960.0. Popravka za dnevnu varijaciju uneta je na osnovu registracija dobijenih na Geomagnetskoj opservatoriji Grocka [15]. Nakon otklanjanja glavnog (normalnog) polja, izrađeno na osnovu geomagnetskog premera I reda SFRJ za epohu 1960.0, izdvojeno je anomalijско polje vertikalne komponente (ΔZ). Gustina podataka na istraživanom prostoru iznosi 1 tačka na 4 km².

Za potrebe ispitivanja magnetskih svojstava uzorkovane su stene različitog litološkog sastava. Prikupljeni su orijentisani uzorci tektonski neporemećenog stenskog materijala, iz kojih su naknadno izbušeni cilindrični uzorci dimenzija 2.5 cm x 2.5 cm. Nad ovim uzorcima izvršeno je merenje prirodne remanentne magnetizacije (NRM) i magnetske susceptibilnosti. Magnetska susceptibilnost je merena na multifrekventnom "Kappabridge MFK1-A" kapametri (AGICO), dok je prirodna remanentna magnetizacija merena na "Spinner JR-5" magnetometru (AGICO).

Za analizu geomagnetskih podataka i primenu transformacija podataka potencijalnih polja (u prostornom domenu) u cilju definisanja položaja tela/uzrocnika anomalija, u horizontalnoj ravni na različitim dubinama, primenjeni su postupci razvijeni u okviru geofizičkog softverskog paketa Geosoft Oasis montaj.

²Vertikalna (Z) komponenta je zapravo projekcija vektora geomagnetskog polja (T) na Z – osu.

Kako bi se pojednostavio oblik magnetske anomalije primenjena je redukcija na pol (eng. reduction to pole – RTP), pri čemu se magnetska anomalija transformiše u anomaliju koja bi bila izmerena da su magnetizacija tela i ambijentalno polje vertikalni. Uticaj remanentne (J_r) i indukovane (J_i) magnetizacije se može izraziti Kenigsbergerovim brojem:

$$Q = J_r/J_i$$

Na osnovu podataka dobijenih merenjem, izrađeno je da Q ima najveću vrednost dva i to na uzorcima dijabaza, zbog čega je moguća primena postupka redukcije na pol. Postupak analitičkog produženja polja zasnovan je na činjenici da se potencijali polja u određenoj ravni mogu odrediti u drugoj ravni. Analitičko produženje polja podrazumeva razunavanje sukcesivnih izvoda vertikalne komponente polja [16], [17]. U horizontalnoj ravni se razunava intenzitet polja u novoj tački na određenoj udaljenosti od površi merenja, a površinska raspodela se uzima u vidu beskonačnog sloja određene debljine. Odnosno, produženjem polja naviše isti se regionalni uticaj. U ovom radu primenjeno je analitičko produženje polja naviše za nivoe 1000 m, 2000 m, 3000 m i 5000 m.

Postupak izvod ugla nagiba omogućava definisanje ivica uzrobnika anomalija polja i dobijanje informacija o njihovom horizontalnom pružanju [18] [19] [20] [21].

Izvod ugla nagiba (TDR) koristi vrednost ukupnog horizontalnog izvoda (THDR), a definisan je kao:

$$TDR = \tan^{-1}[VDR/THDR]$$

gde su VDR i THDR prvi vertikalni i ukupni horizontalni izvodi [17] [18].

S obzirom na prirodu *arctan* funkcije, sve amplitude su vezane za opseg između $+\pi/2$ i $-\pi/2$ (odnosno $+90^\circ$ i -90°), bez obzira na amplitude TDR i VDR. Ova činjenica omogućava funkciji da ujednači i amplitudni odziv vertikalne komponente geomagnetskog polja.

Izvod ugla nagiba ima pozitivne vrednosti iznad uzrobnika (koji izaziva pozitivnu anomaliju), negativnu vrednost van uzrobnika i vrednost nula iznad ili blizu granice uzrobnika, gde je vertikalni izvod jednak nuli, a horizontalni izvod maksimalan [18]. Pored opisanih postupaka, primenjena je i kombinacija TDR i analitičkog produženja polja u cilju definisanja granica uzrobnika za različite nivoe.

3. REZULTATI

Karta anomalija vertikalne komponente GMP-a (ΔZ) na području Makedonije prikazana je na slici 3. Anomalije Z komponente GMP-a, prikazane na karti, imaju opseg od -240 do 480 nT. Na geomagnetskoj karti užeg područja izdvaja se šest oblasti (slika 4)

izduženih u pravcu SZ-JI sa visokim pozitivnim vrednostima ΔZ .

Slika 3 - Karta anomalija Z komponente GMP-a (UZ) svedene na pol na području Makedonije

Oblast A je pozicionirana u jugozapadnom delu karte i predstavljena je paleozojskim stenama. Ove stene prouzrokuju visok intenzitet ΔZ u rasponu od 100 do 450 nT. Druga, susedna oblast (B), zauzima centralni deo karte i odlikuje se relativno niskim vrednostima. Na osnovu OGK i opažanja na terenu može se zaključiti da ih prouzrokuje gabro. Ove niske vrednosti ΔZ za gabro nisu uobičajene i mogu biti posledica velike razlike magnetskih svojstava u odnosu na susedne paleozojske i trijaske/jurske jedinice kao i na dijabazu isto nije od njega (C). Takođe, gabro je veoma ispucao i tektonski poremećen. Oblast C, koja je predstavljena dijabazima, odlikuje se izuzetno visokim vrednostima ΔZ , u rasponu od 210 do 450 nT. Oblast D predstavlja metamorfite SMM i karakteristična je po umerenim vrednostima ΔZ u odnosu na ceo prostor. Oblast E, sa opsegom vrednosti ΔZ od 100 do 350 nT, odgovara položaju granitoidnih stena. Krajnje istočna oblast izdvojena na karti (F), predstavlja SMM i ima isti opseg vrednosti ΔZ kao oblast D. Može se uočiti da su jasno izražene granice među geotektonskim jedinicama, kao i rasprostranjenje granitoidnih intruzija (slika 4).

Slika 4 - Karta anomalija Z komponente GMP-a (UZ) svedene na pol užeg područja na prostoru Makedonije sa izdvojenim zonama prema geotektonskoj karti [9]

Slika 5 - Karte anomalija Z komponente GMP-a (UZ) svedene na pol nakon analiti kog produženja polja za nivoe a) 1000 m, b) 3000 m, c) 5000 m

Na karti izvoda ugla nagiba (slika 6a), okonturene su najverovatnije granice uzro nika anomalija na ovom prostoru. Izdvojene granice odgovaraju granicama gabrova i dijabaza kartiranim na OGC (slika 2). Ovaj kompleks predstavlja deo ispod površine koji ima najveći i uticaj na odziv geomagnetskih anomalija na istraživanom području. Analizom karata dobijenih primenom analiti kog produženja polja, a zatim izvoda ugla nagiba (slika 6 b, c i d), za nivoe 1000, 3000 i 5000 m, granice uzro nika anomalija ispod površine su sve vreme jasno izražene na celom području.

Može se zaključiti da se ofioliti u južnom delu terena, na većim dubinama, prostiru u pravcu S-J, za razliku od njihovog površinskog rasprostranjenja izduženog u pravcu SSZ-JJI. Takođe, sa povećanjem dubine njihova granica sa SMM je pomeren prema istoku. Izgled anomalija na slici 6 ukazuje da u severnom delu Makedonije postoji prekid u kontinuitetu pružanja ofiolita, za razliku od anomalija u južnom i centralnom delu, koje ukazuju na jedinstveno telo/pojas.

Na osnovu podataka dobijenih kombinacijom postupka analiti kog produženja polja i izvoda ugla nagiba, može se zaključiti da sa povećanjem dubine isto na granici ofiolitskog kompleksa pada prema istoku, kao i da OKDK ima bar dva puta veće rasprostranjenje sa povećanjem dubine (slika 6 c).

Slika 6 - Karte izvoda ugla nagiba koji je primenjen za različite nivoe analiti kog produženja polja a) 0 m, b) 1000 m, c) 3000 m, d) 5000 m

4. ZAKLJUČAK

Rezultati primene matematičkih transformacija na geomagnetske podatke pokazuju da OKDK ima jasne i oštre tektonske granice sa jedinicama u neposrednom kontaktu. Utvrđeno je i da ofiolitski kompleks Demir Kapije ima najverovatnije oblik ploče koja pada prema istoku, odnosno jugoistoku. Dobijeni rezultati su u saglasnosti sa ranijim istraživanjima [22] prema kojima cela IVZ pada prema istoku/jugoistoku i da je smeštena ispod SMM. Ovako utvrđen položaj ofiolita Demir Kapije, odnosno IVZ u saglasnosti je sa stanovištem da su ofioliti IVZ smešteni procesima prirastanja prilikom zatvaranja mezozojskog Tetisa [22], kao i sa brojnim geološko-petrološkim i geochemijskim istraživanjima [1] [9] [10].

5. ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane projekta osnovnih istraživanja Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja ON176016; "Magmatizam i geodinamika Balkanskog poluostrva od mezozoika do danas: značaj za obrazovanje metala i nemetala i rudnih ležišta". D.P. se posebno zahvaljuje SEG (Society of Exploration Geophysicists) na finansijskoj podršci.

LITERATURA

- [1] Robertson A. H. F., Trivić B., Djerić N., Bucur I., Tectonic development of the Vardar ocean and its margins: Evidence from the Republic of Macedonia and Greek Macedonia. *Tectonophysics* 595, 25-54, doi: 10.1016/j.tecto.2012.07.022, 2013.
- [2] Bleahu M., Lupu M., Patrulius D., Bordea L., Stefan A., Panin S., Structures of the Apuseni Mts: Bucharest, Romania, 12th Congress of Carpatho-Balkan Geological Association. Buchares, 80, 1981.
- [3] Nicolae I., Tectonic setting of the ophiolites from the South Apuseni Mountains: Magmatic arc and marginal basin. *Romanian Journal of Tectonics and Regional Geology* 76, 27-38, 1995.
- [4] Saccani E., Beccaluva L., Photiades A., Zeda O., Petrogenesis and tectono-magmatic significance of basalts and mantle peridotites from the Albanian-Greek ophiolites and sub-ophiolite mélanges. New constraints for the Triassic-Jurassic evolution of the Neo-Tethys in Dinaride sector, *Lithos*, 124 (3-4), 227-242, doi: 10.1016/j.lithos.2010.10.009, 2011.
- [5] Bortolotti V., Marroni M., Nicolae I., Pandolfi L., Principi G., Saccani E., Geodynamic Implications of Jurassic Ophiolites Associated with Island-Arc Volcanics, South Apuseni Mountains, Western Romania, *International Geology Review* 44, 10, 938-955, 2002.
- [6] Mercier J., *Péleogeographie, orogenèse, métamorphisme et magmatisme des zones internes des Hellenides en Macédoine (Grèce): vue d'ensemble*. Societ Geologie France Bulletin 7, 1020-1049, 1966.
- [7] Lepitkova S., Petrološki, geochemijski i izotopski proučavanja na peridotitite od vnatresnjot dinarski ofiolitski pojas u Republika Makedonija. PhD dissertation, Kiril and Metodij University of Skopje, 333 pp, 2000.
- [8] Himmerkus F., Reischmann T., Kostopoulos D. K., Late Proterozoic and Silurian basement units within the Serbo-Macedonian Massif, northern Greece: The significance of terrane accretion in the Hellenides, in Mountrakis, D. and Robertson A. H. F., eds., *Tectonic Development of the Eastern Mediterranean Region: Geological Society [London] Special Publications* 260, 35-50, 2006.
- [9] Brown S. A. M. and Robertson A. H. F., Sedimentary geology as a key to understanding the tectonic evolution of the Mesozoic-Early Tertiary Paikon Massif, Vardar suture zone, N Greece. *Sedimentary Geology* 160, 179-212, 2003.
- [10] Božović, Prelević D., Romer R., Barth M., Bogaard P. V. D., Boev B., The Demir Kapija Ophiolite, Macedonia (FYROM): a Snapshot of Subduction Initiation within a Back-arc, *J. Petrology*, 54, 7, 1427-1453, doi: 10.1093/petrology/egt017, 2013.
- [11] Brown S. A. M. and Robertson A. H. F., New structural evidence from the Mesozoic-Early Tertiary Paikon Unit, Northern Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece* (1), 159-170, 1994.
- [12] Robertson A. H. F., Karamata S., Šarić K., Overview of ophiolites and related units in the Late Palaeozoic-Early Cenozoic magmatic and tectonic development of Tethys in the northern part of the Balkan region. *Lithos*, ISSN: 0024-4937, 2009.
- [13] Šarić K., Cvetković V., Romer R. L., Christofides G., Koroneos A., Granitoids associated with East Vardar ophiolites (Serbia, F.Y.R. of Macedonia and northern Greece): Origin, evolution and geodynamic significance inferred from major and trace element data Sr-Nd-Pb isotopes. *Lithos*, 108 (1-4), 131-150, doi: 10.1016/j.lithos.2008.09.007, 2009.
- [14] Delipetrov T., Paneva, Geomagnetic field of the Republic of Macedonia in J.L. Rassin and T. Delipetrov (eds.), *Geomagnetics for Aeronautical Safety*, 13-42, 2006.
- [15] Geological atlas of Serbia 1 : 2 000 000 Published by: Ministry of Science and Environmental Protection, Directorate for the Environmental protection and Faculty of Mining and Geology. Chief editor: M. D. Dimitrijević Editorial board: M. D. Dimitrijević,

- M. Komatina, B. Krstić, P. Lokin, M. Marković, B. Milovanović, M. Petković, B. Sikosek and D. Stefanović. Technical editor: Z. Radovanović Geomagnetic Map (6) Maps, text, binding case and design: A. Orđević, M. Starčević, I. Vasiljević Computer arrangements: I. Vasiljević, A. Orđević, M. Starčević, Smiljanic, V. Cvetkov, 2005
- [16] Dean W. C. Frequency analysis for gravity and magnetic interpretation, *Geophysics*, 23: 41-50, 1985.
- [17] Morris B. and Ugalde H, Magnetic remanence constraints on magnetic inversion models, *The Leading Edge*, 2007.
- [18] Miller G. H. and Singh V, Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics* 32, 213-217, doi:10.1016/0926-9851(94)90022-1, 1994.
- [19] Verduzco B, Fairhead J. D, Green M. C, MacKenzie, C, New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23, 116-119, doi: 10.1190/1.1651454, 2004..
- [20] Salem A, Williams S, Fairhead J. D, Ravat D, Smith R, Tilt-depth method: A simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. *The Leading Edge*, 26 (12), 1502-1505, 2007.
- [21] Salem A, Williams S, Fairhead, D, Smith R, Ravat, D. Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivative. *Geophysics* 73, 1, L1-L10, doi: 10.1190/1.2799992, 2008.
- [22] Petrović D, Cvetkov V, Vasiljević I, Cvetković V, A new geophysical model of the Serbian part of the East Vardar ophiolite: Implications for its geodynamic evolution, *Journal of Geodynamics*, 90, 1-13; DOI: 10.1016/j.jog.2015.07.003, 2015.

SUMMARY

SPATIAL DISTRIBUTION OF THE DEMIR KAPIJA (MACEDONIA) OPHIOLITE BASED ON GEOMAGNETIC DATA

The Demir Kapija ophiolite is the largest outcrop of the East Vardar Zone in Macedonia. The aim of this study was to determine the spatial position of this ophiolite by applying mathematical transformations of geomagnetic data. Analysis of anomaly values of geomagnetic data includes processing data that comprise Z component of the magnetic field. Based on these results, it is concluded that the Demir Kapija ophiolite dips to the east/southeast and that the shape of this body is a plate-like. The spatial position of the Demir Kapija ophiolite suggests that the contact with the adjacent Serbo-Macedonian massif is sub vertical close to the surface, and that this contact becomes less steep with increasing of depth. The obtained data suggest that this part of the East Vardar Zone is present below the Serbo-Macedonian unit.

Key words: geomagnetic data, mathematical transformation, spatial distribution, East Vardar Zone, Demir Kapija ophiolite