

A felső köpeny elektromos vezetőképesség-anomáliáinak geotermikus interpretációja

BERDICSEVSZKIJ M. N. — DUBROVSZKIJ V. G. —
LJUBIMOVA E. A. — MANAFI A. I. — NEPESZOV K. N. —
FELDMAN I. S.

(Moszkvai Állami Egyetem, Türkmen SSR Tudományos Akadémiájának Légköri és Földfizikai Intézete, az SZU Tudományos Akadémia Földfizikai Intézete, VNII Geofizikai Kutatóintézetének Azerbajdzsáni fiókjá).

A szerzők ismertetik a magnetotellurikus mélyszondázások eredményeit a délkaszi depresszió és a Magyar-medence területén. Mindkét terület alatt 40–60 km mélységben a felső köpeny egy vezető közbülső rétegét észlelték, ezt a réteget a felső köpeny egy részének felolvadásával értelmezik.

В работе излагаются результаты магнитотеллурических зондирований, проведенных на территории Южно-каспийской депрессии и Венгерской впадины. В верхней мантии на глубинах 40–60 км в обоих районах был выявлен промежуточный проводящий слой. Наличие этого слоя объясняется расплавлением части верхней мантии.

Es werden die Resultate magnetotellurischer Tiefensondierungen im Gebiete der Südkaspischen Depression und des Ungarischen Beckens mitgeteilt. Unter beiden Gebieten in einer Tiefe von 40–60 km wurde eine leitende Mittelschicht des oberen Mantels beobachtet, die durch das Schmelzen eines Teiles des oberen Mantels erklärt wird.

A legutóbbi időkgig a felső köpeny elektromos vezetőképességét a geomágneses variációk térspektrumából határozták meg [1]. A mérések az egész Földre csak vázlatos átlageredményeket adtak. A kapott adatokból feltételezték, hogy a B zóna, melynek néhány száz kilométeres mélységig magas a fajlagos ellenállása, elektromosan majdnem homogénnek tekinthető.

A magnetotellurikus módszer kidolgozásával új lehetőségek tárultak fel a felső köpeny elektromos tulajdonságainak vizsgálatára. A magnetotellurikus kutatásoknak is vannak nehézségei, amelyek az egyenlőtlen üledékek torzító hatásából erednek. Ennek ellenére a magnetotellurikus mélyszondázás segítségével egész sor megbízható eredményt sikerült elérni. Az elektromos szelvények azt mutatják, hogy a felső köpeny elektromos szempontból változékony.

Jelen dolgozatban a délkaszi depressziós területen és a Magyar-medencében végzett magnetotellurikus mélyszondázások eredményeit ismertetjük, régebbi tanulmányokban megjelent munkák folytatásaként [2–4]. Ezekben a korábbi dolgozatokban az első türkmeniai magnetotellurikus mélyszondázások eredményeiből feltételezték, hogy a délkaszi depresszióban kb. 50 km mélységben a felső köpeny egy alacsony fajlagos ellenállású közbülső rétegből áll.

A délkaspi depresszió Eurázsia alpi orogén övezetéhez tartozik. Ez körülveszi a nyugat-türkmeniai süllyedéket, a Kura-alföld egy részét; nyugaton és délen a Kaukázushoz és Elbruszhoz tartozó Kopet-Dag hegység-koplesszum határolja, amely viszonylag magas ellenállású kőzetekből áll. Északon az epihercini Karakum táblás vidékétől mélytörés-rendszerek választják el. A depresszió jól vezető mezokeinozoi formációkból áll, vastagsága 20–25 km. Az összletnek legalább a fele neogén-negyedkorú lerakódásból van felépítve. A földkéreg vastagsága a depresszió központi vidékén erősen lecsökken (a gránit réteg majdnem teljesen kiemelkedik, a bazalt réteg vastagsága nem haladja meg a 10 km-t).

A délkaspi depresszióban a magnetotellurikus mélyszondázásokat négy szelvény mentén végezték el a Türkmen Tudományos Akadémia Földfizikai Intézete, valamint a VNII Geofizikai Kutatóintézet azerbajdzsáni fiók-intézete közreműködésével. Az észlelések kiértékelésénél az impedanciát tenzor-ként vették figyelembe [5].

A magnetotellurikus mélyszondázások görbéi jelentősen függenek az iránytól. Az irányfüggés jelentkezik az elektromágneses tér torzulásában, amely a horizontális geoelektromos egyenletlenségek befolyását mutatja [5]. Világos, hogy regionális és lokális torzulások egyaránt lehetségesek. A regionális hatást kapcsolatba lehet hozni a depresszió magas ellenállású környezetének hatásával. Ilyen fajta hatásokat vizsgált Kovtun A. A. és Dobrovolskaja M. nemvezető gyűrűk és félgűrűk modelljein. Azonban a délkaspi területen végzett magnetotellurikus mélyszondázási görbék analízise nem mutat a modell-kísérleteknek megfelelő törvényszerűségeket. Valószínűleg a tárgyalt területen a regionális hatások sokkal kisebbek, mint a lokális hatások. Ilyen módon feltehető, hogy a torzulások a paleozoos aljzat domborzatával hozhatók összefüggésbe. Az impedancia-poláridiagrammok ezt a föltevést megerősítik, amennyiben a szerkezetek tengelyei szerint irányulnak; így a lineáris tektonikájú tartományokban a helyi irányok az elektromos tér hossz- és keresztirányú polarizációjában mutatkoznak meg.

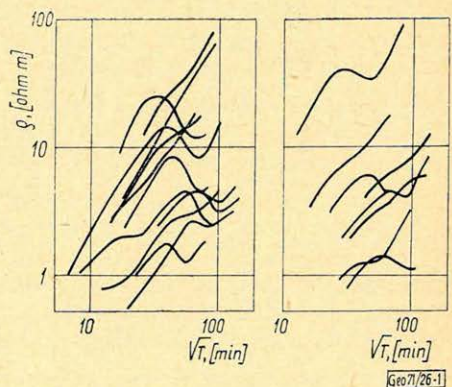
Tipikus hossz- és keresztirányú magnetotellurikus mélyszondázási görbék láthatók az 1. ábrán.

1. ábra. A magnetotellurikus mélyszondázás ϱ_r görbéi a délkaspi depresszióban:
a) hosszgörbék (ϱ'') – b) keresztgörbék (ϱ')

Fig. 1. Кривые магнитотеллурических зондирований ϱ_r в Южно-каспийской депрессии
a – продольные кривые (ϱ'');
б – поперечные кривые (ϱ')

Fig. 1. Die ϱ_r – Kurven der magnetischen Tiefensondierung in der Südkaspischen Depression:

a) Längskurven (ϱ'') – b) Querkurven (ϱ')



A hosszirányú görbék jól rendezett csoportot mutatnak. A depresszió keretét is tartalmazó öt görbe a KH típusú görbékhez tartozik leszálló ágakkal, amelyek a $h = 40$ km és $h = 60$ km mélység közé esnek. A másik öt görbe a depresszió széleit, a gravitációs lépcsőzónát és ennek határán kívüli részeket tartalmazza. Ezek a görbéken felszálló ágak többé-kevésbé figyelemre méltó irányváltozásokat mutatnak, amelyek azonos, vagy közeli mélységhez hajlanak.

A keresztgörbék (ϱ') rendszertelenek, szétbomlottak. Külsőleg emlékeztetnek a ϱ'' hosszanti görbékre, de formájuk szabálytalanul változik, a leszálló ágak és az irányváltások zavarosak.

Ezek az eredmények jól egyeznek a magnetotellurikus mélyszondázás elméletével és gyakorlati tapasztalataival. Ismeretes, hogy az elektromos tér hosszirányú polarizációjánál kisebb torzulások észlelhetők, mint a keresztirányú polarizációnál. A hosszirányú görbék rendszerességét és a keresztirányú görbék rendszertelenségét magyarázhatjuk a paleozoos aljzat szerkezetének hatásával, ez a hatás jelentősen eltérő a két irányban.

A magnetotellurikus mélyszondázás formális értelmezése lehetővé teszi, hogy a felső köpeny szelvényében egy közbülső vezető réteget különböztessünk meg. A h' és S mennyiségek között szoros összefüggés áll fenn: Az S csökkenése h' növekedését vonja maga után. Ilyen összefüggés van, ha az elektromos térnek keresztkomponensére az aljzat szerkezete erősen érezteti hatását. Valóban az elektromos térnek hosszkomponense az aljzat domborzatának lokális emelkedésével növekszik és a görbék jobb-oldali ágai felfelé tolódnak, ami túl nagy mélységnél a felső köpeny vezető rétegét indokolja.

Teljesen más képet kapunk, ha elemezzük a S és h közötti összefüggést, vagyis azt a mélységet, amelyet a hosszgörbék interpretálásával kapunk. Az összefüggés S és h'' között lényegesen gyengébb: egész sor olyan pontot találhatunk, ahol az S ötszörösével vagy annak többszörösével változik, de a h'' mennyiség majdnem változatlan.

Ilyen módon a hosszanti görbéket tekinthetjük a legkevésbé torzultnak a magnetotellurikus mélyszondázásoknál. A 2a ábra bemutatja a h'' hisztogramját, amelyet a ϱ' görbék alapján szerkesztettek meg. A hisztogram világosan kivehető maximumot mutat 40–60 km mélységintervallumban. Éppen ehhez a mélységhez van a felső köpeny vezető közbülső rétege rendelve.

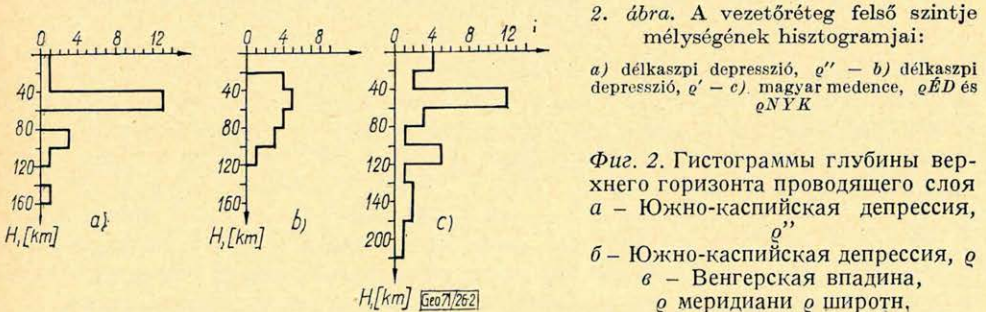


Fig. 2. Histogramme der Tiefe der Oberfläche der leitenden Schicht:

a) Südkaspische Depression ϱ'' – b) Südkaspische Depression, ϱ' – c) Ungarischer Becken, ϱNS und ϱWO

Érdekes a h' mélység hisztogramjával való összehasonlítás, ez a hisztogram a görbék formális interpretációjának eredményéből alakult (2b ábra). Amint látjuk, a keresztirányú görbékből olyan hisztogram szerkeszthető, amely a 20–120 km között mutat nagy értékeket. A hisztogramra jellemző a szórás is, ennek oka a tér torzulása.

Az ekvivalencia elv hatása következtében nem sikerült a vastagságnak és a vezető réteg fajlagos ellenállásának megállapítása. De a pontok egy sorára meg lehet határozni hosszanti vezetőképességüket: S -t. A depresszió szegélyén S eléri a $1 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^4 \text{ ohmm}^{-1}$ értéket, a depresszió részein S lecsökken $5 \cdot 10^3 \text{ ohmm}^{-1}$ értékre. A depresszió határain kívül $S = 0$. Durva becslés szerint a vezető réteg vastagsága a depresszió szegélyén nem több, mint 20 km és a fajlagos ellenállás egy ohmméter törtrészét, vagy néhány ohmmétert tesz ki.

Kísérreljük meg most már az általános kép kialakítását. A délkaszipi depresszió szegélyén a felső köpeny 40–60 km-ig terjedő mélységében van az a réteg, amelynek alacsony a fajlagos ellenállása. Valószínű, hogy a depresszió belső területén is sikerül ennek a kimutatása (a Kaszpi-tenger déli részén). A depresszió peremvidékén a vezető réteg valószínűleg eltűnik, csak északon követhető a nagy Balchan alatt. A Karakum-táblán a réteg hiányzik, ezt éppen az Aschchabad-Bachordok szelvény magnetotellurikus mélyszondázások eredményei mutatják.

Tehát a felső köpenyben jelentkezik egy vezető réteg, a táblás terület és a geoszinklinális átmeneti zónájában.

Magnetotellurikus mélyszondázás a Magyar-medencében.

Ádám A. a Magyar medence és az Orosz táblás vidék magnetotellurikus mélyszondázási görbéinek összehasonlításánál analóg esetekre hívja fel a figyelmet [6, 7].

A Magyar-medence, hasonlóan a délkaszipi depresszióhoz, az eurázsiai alpi orogén övhöz tartozik és a nyugati és keleti Kárpátok, valamint a Dinári hegység között fekszik. Aljzata rögös emelkedésekre, süllyedésekre darabolódik fel, a medencét harmadkori üledékek töltik ki, az üledék-vastagság eléri a 8–10 km-t is. A lerakódások jelentős része pliocén vulkanogén üledékekből áll. A kéreg vastagsága a medence szélein jelentősen elvékonyodik (a gránit réteg 5–10 km-re, a bazalt réteg vastagsága 7–10 km-re csökken le).

A magnetotellurikus mélyszondázásokat a magyar és csehszlovák geofizikusok végezték el [6–11]. A mélyszondázási görbéket a földrajzi szélesség és hosszúság szerint irányították, függetlenül a paleozoos alaphegység domborzatától. A görbék széttartását az aljzat anizotropiájának hatásával magyarázták. Nehezen lehet ezzel az értelmezéssel teljesen egyetérteni, mivel a paleozoos domborzat szerkezeti hatásai nincsenek figyelembe véve. Ennek ellenére említésre méltó, hogy sok görbének van jól kivehető leszálló ága és a formális interpretáció az első vezető réteget 40–60 km mélyen adja meg (2c ábra). Ilyen görbéket a medence belsejében kaptak. Az eredményt csak statisztikusan vehetjük figyelembe. Ha a medencéből a hegységkoszorú felé haladunk, az első vezető réteg 100–120 km mélységre süllyed. Ez az eredmény a délkaszipi depresszióhoz hasonlóan nem hihető.

Mint látjuk, Eurázsia két alpi övének hegységközi medencéje közös sajátossággal rendelkezik: a vezető közbülső réteg a felső köpenyben 40–60 km mélyen van. Vajon milyen geológiai természete van ennek a rétegnek?

A vezető közbülső réteg a felső köpeny egy részének felolvadása által keletkezik

Nyilvánvaló, hogy a vezető közbülső réteg létezése nem magyarázható az elektromos vezetőképesség lassú növekedéséből származó felmelegedéssel. Más jelenségeket is figyelembe kell venni. Vegyük tekintetbe a felső köpeny felmelegedésének lehetőségét a délkelet-keleti depresszió és a Magyar-medence esetében.

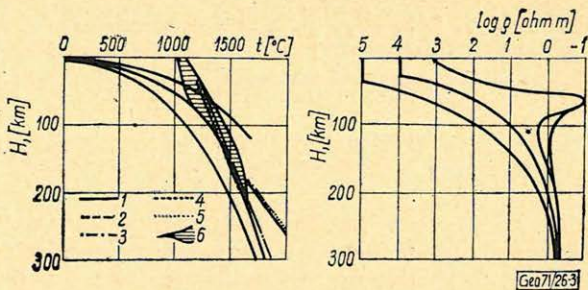
A Magyar-medence magas geotermikus aktivitása jól ismert. A központi részen a hőáram értéke: 2,0–2,2 HFU, ami a jelenlegi vulkáni szigetívek háttér-értékét meghaladja. A Magyar-medence több területén a hőáram nagyobb, mint 2,5 HFU és az egyes anomáliák elérik a Földön észlelt 10–14 HFU maximális értékét. A szegélyzónában a hőáram csökken, 1,5–1,7 HFU-ig.

A délkelet-keleti depresszióban magas geotermikus aktivitást észleltek a szegélyövezben, ahol a hőforrások és iszapvulkánok nagy területen fordulnak elő. Ennek a zónának északi részén a hőmérsékleti gradiens az óceánográfiai mérések szerint 8,5–12 °C/100 m (az SU Tudományos Akadémiája Földfizikai Intézetének Geotermikus és Geoelektromos Osztálya 1969. évi adatai szerint). Ezeknek a gradiens-értékeknek 1,0–2,4 HFU nagyságrendű hőáram felelne meg. Véleményünk szerint a hőáram csökkenésére mutató tendencia – a süllyedék szélétől a központ felé – a vastag üledékrétegek torzító hatásával áll kapcsolatban.

A fokozott geotermikus aktivitás éppúgy fennáll, mint a szeizmikus hullámok sebességének csökkenése a Mohorovičić felületeken a megfigyelt süllyedékek területén. Ismeretes azonkívül, hogy az alpi és kárpáti földrengéshullámok a Magyar-medence alatt erősebben csillapodnak, mint a medence határain kívül [13].

A 3. ábrán láthatók azok a hőmérsékleti görbék, amelyek a hőáram különböző értékeire számíthatók. Az 1. számú hőmérsékleti görbét Vlassow V. K. szerkesztette a Moszkvai Állami Egyetem számítóközpontjában, $q = 2,1$ HFU esetére és 43 pm vastag földkéregre, ebből a vastagságból 20 km az üledékréteg, 23 km a bazaltréteg. A földkéregnek ez a modellje megfelel a délkelet-keleti depresszió szélső zónájának, ahol a hőáramméréseket végezték. A köpeny hővezető képességének számításánál tekintetbe vették a sugárzási- és fononkomponenst is, mint a hőmérsékletváltozás és a nyomás mélységi függvényét [12]. A köpeny hőtermelésének sűrűség-eloszlását a mélység függvényében Masuda adataiból vették. Kis hőáramok számára a hőmérséklet-görbét Szmirnov Ja. B. szerint számították [14]. Ugyanazon az ábrán vannak a felső köpeny összetételében feltételezett ásványi társulások és a kőzetolvadás görbéi feltüntetve. Figyelemre méltó, hogy a hőmérsékleti görbe a 40–70 km között metszi az olvadási görbét. Tehát ebben a mélységben lehetséges a felső köpeny kőzeteinek felolvadása (és lehet még kisebb mélységben is, ha tekintetbe vesszük a horizontális kiterjedés következtében fellépő nyomáscsökkenést.)

Laboratóriumi mérések mutatják, hogy a kőzetek elektromos vezetőképessége 2–3 nagyságrenddel növekszik felolvadás esetén. Az olvadási zóna kezdé-



3. ábra. Hőmérsékletgörbék, olvadásgörbék és a fajlagos ellenállás görbéi;

a) 1 - hőmérsékletgörbék, különböző hőáramok szerint:
 $I - q = 2,1 \text{ HFU}$, $II - q = 1,9 \text{ HFU}$, $III - q = 1,7 \text{ HFU}$; - 2,5 - olvadásgörbék: 2 - kvartholeit [15]; 3 - pyrolit [16], 4 - basalt [17]; 5 - basalt [18]; 6 - a bazalt olvadási tartomány, nemhidrosztatikus nyomás alatt [19];
 b) a fajlagos ellenállás görbéi, amelyek az I-II-III hőmérsékleti görbéknek felelnek meg.

Фиг. 3. Температурные кривые, кривые расплавления и кривые удельного сопротивления;
 а - температурные кривые по различным тепловым потокам:

$I - q = 2,1 \text{ HFU}$, $II - q = 1,9 \text{ HFU}$, $III - q = 1,7 \text{ HFU}$
 2,5 - кривые расплавления: 2 - квартолеит (15); 3 - пиролит (16), 4 - базальт (17);
 5 - базальт (18) б - область расплавления базальта под негидростатическим давлением (19);
 б - кривые удельного сопротивления, соответствующие температурным кривым I - II - III.

Fig. 3. Temperaturkurven, Schmelzkurven und Kurven des spezifischen Widerstandes:

a) 1 - Temperaturkurven, nach verschiedenen Wärmeflüssen:
 $I - q = 2,1 \text{ HFU}$, $II - q = 1,9 \text{ HFU}$, $III - q = 1,7 \text{ HFU}$ 2,5 - Schmelzkurven: 2 Quarztholeit [15] 3 - Pyrolit [16]
 4 Basalt [17] 5 Basalt [18] 6 - Schmelzgebiet des Basalts, unter nicht-hydrostatischem Druck [19].
 b) Kurven des spezifischen Widerstandes, entsprechend den Temperaturkurven I - II - III.

tén az elektromos vezetőképesség ugrásszerűen megnő. Az azt követő koncentráció-növekedés a folyékony fázisban már nincs hatással az elektromos vezetőképesség nagyságára. Ilyen módon jön létre a mélyben ugrásszerűen az elektromos vezetőképesség növekedése, ahol a folyékony-fázis határkoncentrációját eléri és egy jól elhatárolt vezető közbülső réteg keletkezik. A 3b ábrán mutatjuk be a felső köpeny fajlagos ellenállási görbéit, amelyek a fent leírt hőmérsékleti görbéknek felelnek meg. A számítások az olivin vezetőképességének paraméterein alapulnak, amelyeket Feldman I. S. és Bondarenko A. T. kísérletekkel határozott meg. A kísérletet az SU. Tudományos Akadémiájának Földfizikai Intézetében végezték. Ha a hőmérsékleti görbe az olvadási görbét metszi, akkor a fajlagos ellenállás görbéje minimumot mutat, ez az olvadási zónában levő folyékony fázisra utal. Éppen ezt az olvadási zónát találjuk a délkaszi depresszió és a Magyar-medence alatt 40 - 60 km mélyen.

A délkaszi depresszióban és a Magyar-medencében a felső köpeny kőzeteinek részfelolvadása a terület fiatal vulkanizmusával függ össze. A Magyar-medencében jól ismertek az oligocén-kvarter vulkanogén lerakódások. A délkaszi depresszió kerületén észlelt intenzív mágneses anomáliák alapján feltehető, hogy itt is a pliocén-kvarter bázisos vulkáni réteggöszletek széles kiterjedésben fordulnak elő [20].

- [1] *Rikitake, T.*: Elektromágnesség és a Föld belső felépítése, Nedra, Leningrád, 1968.
- [2] *Berditschevskij M. N., Nepesov K. N., Dobrovskij V. G., Fainberg E. B.*: A Földkéreg geoelektromos karakterisztikája és a felső köpeny Türkmeniában. Izv. AN SSSR, Ser. Geofiz. 10. 1970.
- [3] *Gochberg M. B., Dubrovskij V. G., Nepesov K. N.*: A türkméniai mágneses viharok felhasználásának eredményei a mélyszondázások részére. Izv. AN SSSR, Ser. Geofiz. 12. 1968.
- [4] *Berditschevskij M. N., Vanjan L. L., Gohberg M. B., Dubrovskij V. G., Fainberg E. B.*: Új eredmények a magnetotellurikus mélyszondázások területén. Izv. AN SSR, Ser. Geofiz. 3. 1967.
- [5] *Berditschevskij M. N.*: Elektromos felderítő mélységek a magnetotellurikus szelvényezés módszerével. Nedra 1968.
- [6] *Ádám A.*: Über den Informationsgehalt der elektromagnetischen Messungen in Ungarn. Annales de géophys. 23, 1, 1967.
- [7] *Ádám A., Verő J.*: Magnetotelluric deep soundings in Hungary. Acta geodaet. geophys. et montan. Akad. Sci. Hung. 3. 1–2. 1968.
- [8] *Ádám A.*: A felső köpeny elektromos jólvezető rétegének összefüggése a nagytektonikával. Geofiz. Közlem. 17. 1–2. 1968.
- [9] *Ádám A.*: A kéreg és a felső köpeny elektromos felépítése Magyarországon a magnetotellurikus és relatív tellurikus frekvencia-szondázás alapján. Geofiz. Közlem. 13. 2, 1964.
- [10] *Ádám A.*: A magyarországi elektromágneses mérések információiról. Geophys. Közlem. 17, 1–2, 1968.
- [11] *Praus O.*: Study of the electric conductivity of the Earth on the territory of Czechoslovakia. Studies geophys. et geodaet. 3. 1967.
- [12] *Ljubimova E. A.*: A Föld és a Hold termikája. Nauk 1968.
- [13] *Babuska VI., Ruprechtova L.*: Contribution to the investigation of East-Alpine earthquakes. Gofiz. Sb. 13, 1966.
- [14] *Szmírnov Ja. B.*: A hőáram összefüggése a földkéreg és a felső köpeny felépítésével és fejlődésével. Geotektonika 6. 1968.
- [15] *Anderson D. L.*: Structure and composition of the Earth's mantle. Physics and Chemistry of the Earth, 1965.
- [16] *Ringwood A. E., Green D. H.*: An experimental investigation of the gabbro-eclogite transformation and some geophysical implication, Tectonophysics, 3–5. 1966.
- [17] *Scheinmann Ju. M.*: A mélyföldtan alapjai (a tektonika összefüggése a magmák keletkezésével) Nedra, 1968.
- [18] *Yoder C. S., Tilley K. E.*: A bazaltmagmák származása. Mir. kiadó 1968.
- [19] *Uffen R. J., Jessop A. M.*: The stress release hypothesis of magma formation. Bull. Volcan. 1963.
- [20] *Borisov A. A.*: A SU területének mélyszerkezete geofizikai adatok alapján. Nedra kiadó, 1967.