

A köpeny eredetű kőzetek felismerésének története és szerepe a geológiai gondolkodás fejlődésében

EMBEY-ISZTIN Antal

Magyar Természettudományi Múzeum Ásvány- és Kőzettár

Recognition of mantle-derived rocks and their role in the evolution of geological thought

Abstract

Since the beginning of the 1960th two new events have revolutionized the evolution of geological thought. One of them, the plate tectonics, which is well known to the public, the other one is the recognition of mantle-derived rocks and the new results related to the investigation of the latter samples. Even if these results have also revolutionized the earth sciences, the real significance of this issue is known to a narrower group of specialists only. The present paper discusses the history of recognition of mantle samples and tries to demonstrate the immense progress of our knowledge due to the detailed investigations of these rock samples.

Keywords: history of science, mantle, peridotite

Összefoglalás

Az 1960-as évek elejétől két új momentum forradalmasította a geológiai gondolkodás fejlődését. Az egyik, a lemeztectonika, mely széles körben vált ismertté, a másik a köpenyszármazású kőzetek azonosítása és az ebből fakadó új eredmények. Bár ez utóbbi is gyökerestül változtatta meg a geológia tudományát, ennek igazi jelentőségét inkább csak a szakemberek ismerik. Ez a dolgozat a köpenykőzetek felismerésének történetét követi nyomon, valamint néhány kiragadott példán keresztül igyekszik bemutatni azt az óriási fejlődést, melyet e kőzetek részletes vizsgálatainak köszönhetünk.

Tárgyszavak: tudománytörténet, köpeny, peridotit

Bevezetés

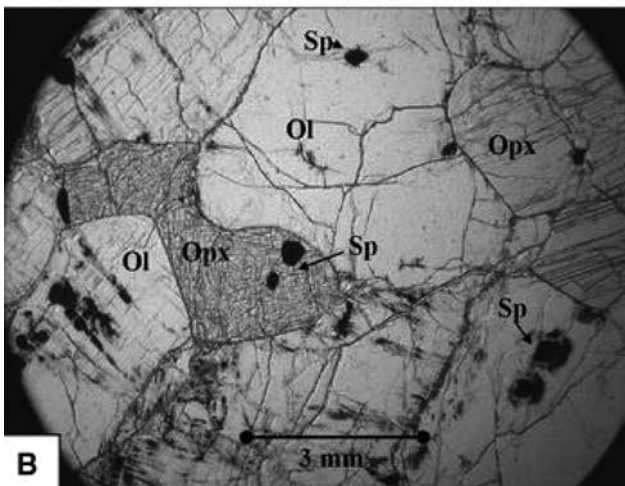
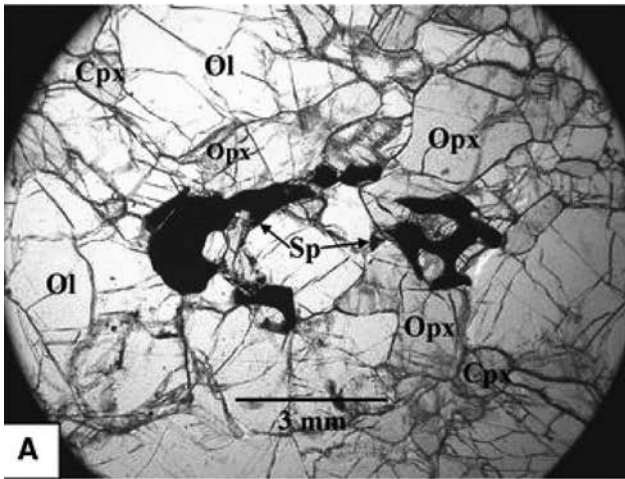
Amióta Harry Hammond HESS (1962) hipotézise alapján, Frederick VINE és Drummond MATTHEWS (1963) elsőként bizonyították az óceáni aljzat tágulását, a lemeztectonika elmélete gyökerestül változtatta meg a geodinamikai gondolkodást. A lemeztectonika nemcsak a szakemberek paradigmája, de a középiskolai oktatás és az ismeretterjesztés révén már az alpműveltség része is lett. Nagyjából ezzel párhuzamosan kezdődött el egy másik geo-forradalom is, mely azonban jóval kevesebb hírvérést kapott és ez a Föld köpenyéből származó kőzetminták felismerése és azok beható vizsgálata. Ennek eredményei legalább olyan mértékben változtatták meg a bolygónk fejlődését befolyásoló folyamatok megértését, mint a lemeztectonika. Ezt megelőzően elképzelhetetlennek tartották, hogy a kéreg alatti köpenyanyag hozzáférhető lehetne, így a geológia kizárólag a kéregre koncent-

rálhatott, a köpeny kutatása a geofizika hatáskörében maradt. Ez utóbbi szeizmikus mérések alapján kimutatta, hogy a kéreg-köpeny határon a P-hullámok sebessége érezhetően megemelkedik, amiből arra lehetett következtetni, hogy az alsó kéreg bázisos, a köpeny viszont ultrabázisos kőzetekből állhat, de természetesen a pontos litológiai besorolás továbbra is homályban maradt. Az alábbiakban vázlatosan áttekintjük a felszínre került köpenyminták megismerésének történetét, valamint dióhéjban ismertetünk néhány fontos tudományos áttörést, mely e minták nélkül nem valósulhatott volna meg.

Peridotit xenolitok

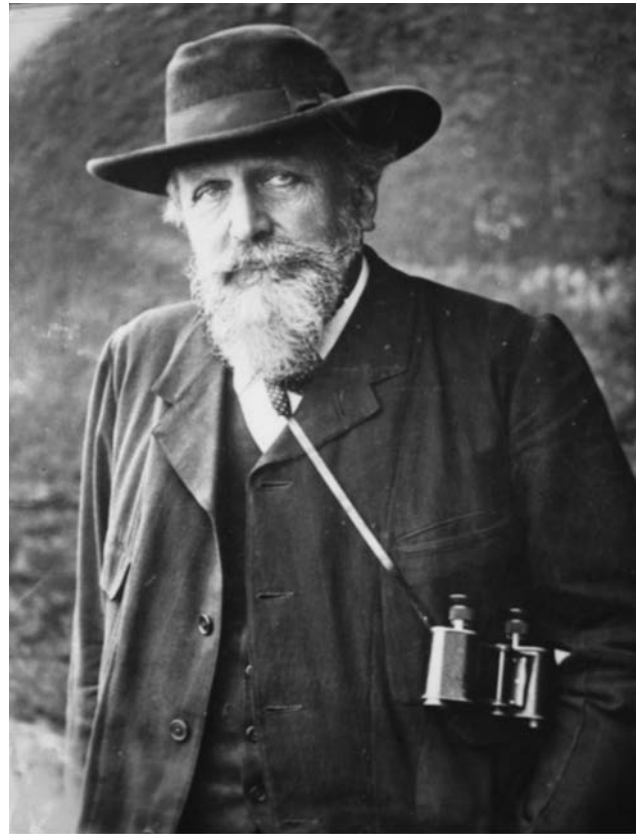
A felszínre jutott köpenyanyagok közül elsőként az alkáli bazaltos és rokon kőzetekben talált peridotitzárványok (korábbi nevükön „olivincsomó”, „olivinszikla”, „olivin-

bomba”) keltették fel a mineralógusok figyelmét (1. ábra). Azon túl, hogy mint ásványtani különlegességet leírták, kezdetben semmilyen jelentőséget sem tulajdonítottak nekik. Ezt jól illusztrálja a pionírnak számító Antoine LACROIX (2. ábra), 1893-ban megjelent könyvéből vett következő



1. ábra. Két szentbékállai peridotitxenolit mikroszkópi képe, A: lherzolit; B: harzburgit. (ol: olivin, opx: ortopiroxén, cpx: klinopiroxén, sp: spinell, és egy teljesen ép spinell peridotit zárvány salakos bazaltban Mongóliából)

Figure 1. Microscopic image of two Szentbékállai peridotite xenolithes, A: lherzolite; B: harzburgite. (ol: olivine, opx: orthopyroxene, cpx: clinopyroxene, sp: spinel, and a totally fresh spinel peridotite inclusion in scoriaceous basalt from Mongolia)



2. ábra .Antoine LACROIX (1863–1948)

Figure 2. Antoine LACROIX (1863–1948)

idézet: „*Ces noudules sont plus abondants parmi les produits de projection que dans les roches massifs... ils ont été si souvent décrits qu’il reste peut de chose à en dire au point de vue mineralogique.*” („Ezek a csomók gyakoribbak a vulkáni termékekben, mint a mélységi eredetű masszívumokban... oly gyakran írták le őket, hogy kevés dolgot lehet már róluk mondani ásványtani szempontból”).

A huszadik század első felében már sokan foglalkoztak a peridotitzárványok eredetének kérdésével, többek között SCHADLER (1914), ERNST (1935), CHUDOBA & FRECHEN (1941), TURNER (1942), FRECHEN (1948), ROSS et al. (1954). Mindannyian azon fáradoztak, hogy eldöntsék vajon ezek a kőzetdarabok magmából származó ásvány szegregációk-e, avagy idegen kőzetzárványok, azaz xenolitok. Végül ROSS, et al. (1954) munkája, mely elsőként közölt komplett kémiai elemzést minden ásványfázisról és több lelőhelyről, az utóbbi lehetőség mellett állt ki. A korszak lezárásának idején az akkori legjelentősebb kőzettani kézikönyv (TURNER & VERHOOGEN 1960) röviden a következőkben foglalta össze a köpeny összetételéről szóló, megszilárdulni látszó, új álláspontot. A szeizmikus sebesség értékekből kiindulva a 435. oldalon ezt írja: „*Very few rock types have such characteristics, and the choice narrows down to either peridotite (or dunitite) and eclogite. Of the two, the former seems preferable, because of the widespread occurrence in basaltic ejecta, all over the world, of peridotite nodules of astoundingly uniform composition...*”. („Nagyon kevés kőzettípusnak vannak ilyen

jellemzői, és a szűk választék peridotit (dunit), vagy eklogit. A kettő közül az első tűnik perspektivikusnak, a világszerte meglepően egységes összetételű peridotit-zárványok gyakorisága miatt a bazaltos kiterjedési termékekben...”).

Hazánkban két bazalttal foglalkozó monografikus műben (HOFMANN 1875–78, 3. ábra, továbbá VITÁLIS 1911, 4. ábra) a zárványokat különböző neveken, pl. „olivinszikkla”, (a német „Olivinfels” fordításaként) és „olivinbomba” említik. Ez utóbbi onnan származik, hogy a bazaltláva bombák magjait gyakran peridotit-zárványok alkotják, mint pl. a Balaton-felvidéki Bondoróhegyen is. KOCH Sándor (1966) „Magyarország ásványai” c. könyvében már néhány kémiai elemzés is megtalálható róluk. A zárványok felső köpeny származásáról írt első magyar nyelvű értekezés éppen ennek a folyóiratnak a hasábjain jelent meg (EMBEY-ISZTIN 1976a) és még ugyanebben az évben, angol nyelven egy ritkaságnak számító összetett szigligeti zárvány ismertetésére is sor került (EMBEY-ISZTIN 1976b).

Az 1960-as évekig a közzétett leíró jellegű volt, de ezt követően egyre több és egyre pontosabb analitikai adat született. Fontossága miatt a köpenyxenolitok vizsgálata sláger téma lett, amit az is mutat, hogy míg FORBES & KUNO (1967) világszerte 200 lelőhelyről írt, MENZIES (1983) 300 lelőhelyet számolt össze, ma már legalább 3000-et ismerünk. Nem lehet célunk tehát ezek történeti ismertetése, e helyett a cikk máso-



3. ábra HOFMANN Károly (1839–1891)
Figure 3 Károly HOFMANN (1839–1891)



4. ábra VITÁLIS István (1871–1947)
Figure 4 István Vitális (1871–1947)

dik részében néhány, a földtudomány fejlődésének olyan jelentős momentumát mutatjuk be, melyek a köpenyanyagok ismerete nélkül nem születhettek volna meg.

Egyéb köpeny eredetű közzettettek Földünk felszínén

Miután a bazaltok peridotit-zárványainak köpeny eredete általánosan elfogadott véleménnyé vált, a közzetani és geokémiai rokonságuk alapján a tektonikai mozgások által felszínre jutott peridotit-masszívumok köpeny eredete is hamarosan felmerült, bár a lemeztektonika előtt nem volt magyarázat arra, hogy miként is juthattak a felszínre. Ezt jól tükrözi W. V. De ROEVER (1957) „Sind die alpinotypen Peridotitmassen vielleicht tektonisch verfrachtete Bruchstücke der Peridotitschale?” (Lehetséges, hogy az alpi típusú peridotitmasszívumok a peridotit-héjból elmozdított töredék darabok?) c. munkája. Ide sorolhatók még az ofiolitok peridotitos részei és az óceánfenékről kikapart peridotitminták. Ez utóbbiak köpeny származásának felismerése a lemeztektonika korában már szinte természetes volt. A tektonikailag feljutott peridotitmasszívumok mérete néhány méteres nagyságrendtől a több kilométeresig terjed, így



5. ábra Norman Levi BOWEN (1887–1956)
Figure 5 Norman Levi BOWEN (1887–1956)

esetükben a térbeli, időbeli, strukturális és litológiai változatosságuk is tanulmányozható. Hátrányuk viszont a vulkánkitörésekkel gyorsan felszínre jutó és ezért gyakran teljesen ép xenolitokkal szemben, hogy a felszínre kerülésük lassú folyamat, ami alatt lezajló retrográd metamorfózis és mállás sok információ elvesztésével jár.

Eddig a pontig felsorolt típusok közvetlen mintái a köpenynek, de nagyon fontosak az indirekt minták is, azaz a köpenyből származó bazaltok, különösen az óceáni bazaltok, mivel ezek kontaminációja a kontinentális kéreggel kizárható. A bazaltok ugyanis hűen leképezik a köpenyforrás izotóparányait és annak nyomelem összetételére az elemmegoszlási hányadosok ismeretében jó következtetéseket tehetünk.

Néhány új felismerés, mely gyökeresen változtatta meg a geológiát

Bazaltmagma eredete

Bár Norman Levi BOWEN (5. ábra) a kísérleti petrológia megalapítója híres könyvében (1928) már felvetette az a gondolatot, hogy köpenyperidotit lehet a bazaltok forrásterülete, de kezdetben ezt a felvetést senki, még ő maga sem vette komolyan. E helyett a fő problémája nem az volt, hogy honnan származnak a magmák, hanem, hogy az egyik magmatípusból hogyan vezethető le egy másik. A petrológiai kutatás célja az lett, hogy megértsük, miként tud egy magma

egy másik magmává alakulni (pl. frakcionált kristályosodás, folyadék-szételegyedés, asszimiláció, magmakeveredés stb.). A kiinduló pont egy „primér bazalt” volt, amiből fokozatosan a gránitmagmáig bezárólag minden magmás kőzet leszármaztatható. Hogy a „primér magma” honnan származik, a kéregből, esetleg valamilyen bizonytalan olvadákrétegből, annak nem tulajdonítottak közvetlen jelentőséget. Az 1950-es évek végére azonban az elképzelés, hogy a peridotitos köpeny parciális olvadása az, ami a bazaltos magmák keletkezését okozza, egyre több publikációban jelent meg (pl. WAGER 1958, KUNO 1959, TURNER & VERHOOGEN 1960, GREEN & RINGWOOD 1967; RINGWOOD, 1962). Különösen is jelentős volt RINGWOOD „pyrolit” modellje (egy rész tholeiitből és három rész dunitból álló elméleti kőzet), mely a felső köpeny összetételét volt hivatott reprezentálni. A pyrolittal végzett nagynyomású kísérletek végleg kiszorították azt a korábban népszerű elképzelést, hogy a köpeny bazaltos és nem peridotitos összetételű. A hatvanas évek elejére a köpenyperidotitok parciális megolvadása csaknem általánosan elfogadott modell lett a bazaltok petrogenézisével kapcsolatban.

Újratermékenyülés (refertilization)

A köpenyperidotitok nagy része termékeny (fertile) lherzolit, azaz csak csekély mennyiségű parciális olvadékot veszített, más része viszont harzburgit, amely nagyobb mértékű olvadás következtében bazaltolvadék-képzés szempontjából terméketlenné, kimerültté (depleted) vált. Évtizedeken keresztül az a nézet uralkodott (a xenolitikus körében jelenleg is), hogy az elsődleges primer köpeny termékeny lherzolit, a harzburgit resztit, mely a bazalt távozása után maradt vissza. Nagy meglepetést okozott azonban, hogy az orogén övekhez kapcsolódó, alpi típusú peridotitokban ez fordítva is történhet, azaz a korábban kimerült harzburgitból, bazaltos olvadékkal történt reakció révén újra termékeny lherzolit lesz. Ezt legrészletesebben LE ROUX et al. (2007) demonstrálták a francia Pireneusok Lherz (a lherzolit típuslelőhelye!) nevű tava közelében található peridotitmasszívum vizsgálata során. Kiderült, hogy itt a lherzolit, amelyet mindig is primer kőzetnek gondoltak, tulajdonképpen másodlagos, azaz, a harzburgit, valamint a bazalt olvadék reakciójának terméke. Különösen a szerkezeti vizsgálatok voltak perdöntőek, melyek bizonyítják, hogy az adott esetben a harzburgit idősebb, mint a lherzolit.

Kémiai geodinamika

ALLÈGRE (1982, valamint ZINDLER & HART (1986) által fémjelzett kémiai geodinamika, a köpenygeokémia és a geofizika együttes alkalmazása a szilárd Föld fejlődésének megértéséhez. A geofizika, természeténél fogva, csak a Föld jelenlegi állapotát képes jellemezni, a geokémia és az izotóp-geokémia viszont történeti távlatokban is hatásos eszköz. A köpenytomográfia segítségével kimutatható, hogy a szubdukált lemezek olykor a felső és alsó köpeny

közötti átmeneti övig (400–670 km), máskor pedig egészen a köpeny-mag határig is (2700–2900 km) lehetnek. A forrópontok alatt a forró anyag, ez utóbbi mélységből emelkedik fel. E folyamatok következtében a köpeny heterogénné válik. Azt azonban, hogy óceáni vagy kontinentális kéreg, óceáni bazalt és/vagy szediment került-e nagy mélységbe és ez az esemény mikor történhetett, csakis a geokémia képes tisztázni. Az óceáni szigeti bazaltok ugyanis nagy mélységből erednek és olyan köpeny komponenseket is tartalmaznak, melyek éppen a szubdukció folytán kerülhetnek a felszínről a mélybe. Például a geokémiai vizsgálatok kimutatták, hogy a Szent Ilona-sziget bazaltja 18–8%-ban, felszínről betolódott, óceáni kéreg eredetű olvadékot is tartalmaz. A jelenlegi Pb, Sr, Nd és Hf izotóparányok alapján és a radioaktív bomlást figyelembe véve a szubdukált óceáni kéreg tartozódási ideje a köpenyben minimálisan 1,2 milliárd év lehetett (KAWABATA et al. 2011).

Számos hasonló eredmény született, de a kémiai geodinamika tárgyában talán az okozta a legnagyobb meglepetést, hogy a 4,5 milliárd éve tartó konvekciós mozgás és köpenykeveredés ellenére is sikerült bizonyítékot találni olyan primitív köpenyrezervoárra, mely zárt rendszer maradt még ilyen hosszú idő után is. Erre senki sem számított addig, míg néhány forró ponton (pl. Hawaii, Izland) a lávák $^3\text{He}/^4\text{He}$ izotóparányait meg nem mérték (pl. KURZ et al. 1983, PORCELLI & ELLIOTT 2008). Kiderült, hogy ezek az arányok akár ötvöszerezettek lehetnek, mint a jelenlegi atmoszféra $^3\text{He}/^4\text{He}$ hányadosa. A ^3He izotóp a kozmikus sugárzás okozta nukleáris reakció következtében az ősködben jött létre, amiből a Föld és társai létrejöttek. A köpenyben és még inkább a kéregben az U és Th radioaktív bomlása miatt a $^3\text{He}/^4\text{He}$ hányados ennél sokkal kisebb lett. A köpenytomográfiai vizsgálatok bizonyították, hogy e forró pontok alatt a köpenyfeláramlás igen nagy mélységből, a köpeny-mag határvidékéről történik. Úgy sejtjük, hogy az itt elhelyezkedő, különleges reológiai állapotban lévő, átmeneti jellegű ún. D'' rétegben lehet az a különleges primitív rezervoár, amely a Föld keletkezése óta megőrződött.

A köpeny víztartalma

Bár a köpenyben nominálisan vízmentes ásványok (olivin, piroxének, gránát) uralkodnak, óriási jelentősége van annak, hogy az 1980-as évek végétől egyre több kutató ismerte fel azt, hogy a köpenyásványok rácshibáiba hidrogénionok épülhetnek be (lásd HIRSCHMANN & KOHLSTEDT 2012, KOVÁCS et al. 2012, DEMOUCHY & BOLFAN-CASANOVA 2016). A hidrogén szerkezetileg hidroxil (OH) formájában kötött és bár a mennyisége korlátozott, de miután a köpeny messze a legnagyobb része Földünknek, így becslések szerint 1–2 óceáni tömegnek megfelelő víz lehet benne (1 óceáni tömeg = $1,4 \times 10^{21}$ kg).

A víz nem egy passzív rezervoár a köpenyben, hanem fontos szerepe van a Föld dinamikájában. Befolyásolja az ásványok és kőzetek tulajdonságait, az olvadást, a viszkózus elmozdulást, a deformációs jelenségeket, vagyis a reológiai

viszonyokat. A víz inkompatibilis, azaz parciális olvadás esetén az olvadékba távozik és a maradék köpeny viszkózitása, szilárdsága megnövekszik. Ennek szerepe van abban is, hogy Földünk legősibb archaikumi kratonjai (pl. Kaapvaal, Dél-Afrika; Jakutija, Szibéria) és azok kivastagodott köpenylitoszféra-gyökerei évmilliárdokon keresztül fennmaradhattak, miközben más fiatalabb régiók intenzív tektonikai eseményeket éltek át. A kratonok köpeny litoszféráját a kimberlitek által nagy mélységből felhozott gránátperidotit és eklogitxenolitokból és xenokristályokból ismerhetjük meg. Összehasonlítva a fiatalabb területek bazaltjainak spinellperidotit zárványával, a kratonok gránátperidotitjai sokkal nagyobb mértékű olvadáson mentek át, ami által vizüket elvesztették, ezért szilárdabbá, ellenállóbbakká váltak. Ugyanakkor a vastartalmuk drasztikusan csökkent és a magnéziumtartalmuk relatíve megnőtt. Ez utóbbi a litoszféraköpeny sűrűségének csökkenésével járt. Mindkét faktornak szerepe lehetett az ősi kratonok fennmaradásában, mivel nem süllyednek be a kevésbé viszkózus asztenoszféra és ellenállóak a pusztító erőkkel szemben (konvekció, kollízió/orogén, extenzió/riftesedés). Minden kontinens magja egy, esetleg több archaikumi kraton. A kivastagodott köpeny litoszféra Re–Os izotóp kora $>2,5$ milliárd év, a legidősebb akár 3,7–3,8 milliárd év is lehet. Ezek egyben a legősibb kontinentális kéreg keletkezésének helyei is. A kontinentális kéreg földi specialitás, a Naprendszer más bolygóin vagy holdjain hiányoznak. A kratonok rendkívüli tulajdonsága a Föld folyamatos lehűlésével magyarázható. A nagymértékű (~30%) megolvadás 1650 °C feletti potenciális hőmérsékleten történt, ezzel szemben a modern óceán közepi bazaltok esetében a megfelelő értékek ~7% és 1350 °C. Mindez arra int, hogy az aktualitás elve messze nem korlátlanul alkalmazható, a jelen kor geodinamikáját nem extrapolálhatjuk az archaikumi időkbe.

A teljes szilikát Föld összetétele

A teljes szilikát Föld alatt a szilárd Földet értjük a magot leszámítva. Összetételének meghatározásához primitív köpenyxenolit mintákra volt szükségünk, mert ezekben a sziderofil elemeket leszámítva a többi elem gyakorisága a kőzetbolygókat felépítő kondritos meteoritokéhoz hasonló kell, legyen. Valóban, a magas hőmérsékleten kondenzálódó ún. refraktórikus litofil elemek (Ca, Al, Ti, Sr, lantanidák stb.) mind kondritos arányban vannak jelen a primitív köpenyben. A volatilis elemek (Pb, Tl, Hg, Bi, C stb.) azonban a volatilitás mértéke szerint egyre kisebb értékeket mutatnak a kondritokhoz képest, ami azt tükrözi, hogy Nap–Föld távolságban a kondenzáció a napködből nagy hőmérsékleten történt és a volatilis elemek igen jelentős része nem tudott kondenzálódni. A sziderofil elemek (pl. W, Ni, Co, Au, platina fémek) zöme pedig a vasmagba vándorolt.

Az előbbieket figyelembevételével, joggal merülhet fel a kérdés, hogy honnan van a Föld víztartalma. Ugyanis, ha a mérsékelt volatilis elemek, mint a Zn, Ag, As, Sb, Sn, Pb 92–98%-os veszteséggel kondenzálódtak, akkor nagy

mennyiségű víz aligha kerülhetett be a rendszerbe. DREIBUS & WÄNKE (1987) vetették fel azt az ötletet, hogy a Föld akkréciója két ütemben történhetett. Először egy redukált állapotú száraz fázis volt, melyben a Föld zöme felépült, majd később ezt egy oxidált nedves fázis követte. Ebből alakult ki az ún. „késői furnérlemez” hipotézis. Ennek lényege, hogy 3,8 milliárd év körül az aszteroida övből származó, nagy víztartalmú, karbonátos, kondritos aszteroidák becsapódásainak száma hirtelen megnőtt, amit valószínűleg a Jupiter és a Szaturnusz befelé irányuló, majd visszaforduló migrációja idézhetett elő. Ekkor keletkeztek a Hold nagy krátere is. A Föld nyilván sokkal több ilyen becsapódásban részesedett, ami jelentős mennyiségű víztömeget eredményezhetett. A hipotézist valószínűsíti, hogy a földi víz és a karbonátos kondrit vízének deutérium/hidrogén aránya megegyezik. Ezen felül a késői „nehéz bombázás” a Föld egy másik fontos geokémiai tulajdonságára is magyarázatul szolgál. Ez pedig az erősen sziderofil elemek (Os, Ir, Ru, Rh, Pt, Pd, Re, Au) anomálishan magas koncentrációja a köpenyben. Ráadásul, ezek az elemek kondritos relatív arányokban vannak jelen, ami fém-szilikát egyensúlyi megoszlás esetén nem várható. Az erősen sziderofil elemeket ugyanis a korai magképződés kivonta az olvadt állapotú köpenyből (magmaóceán), ezért a váratlanul magas koncentrációjuk csakis a mag képződés utáni kondritos anyag Földünkre kerülésével képzelhető el.

Mikor kezdődött a modern stílusú lemeztectonika a Földön?

Annak a kérdésnek az eldöntése, hogy mikor és hogyan kezdődött a modern stílusú lemeztectonika működése, alapvető bolygónk fejlődésének megértésében. A modern stílusú lemeztectonika hajtóereje az idős óceáni litoszféra nagyobb sűrűsége, amelynek következtében az óceáni litoszféra mélyre besüllyed a szubdukciós zónákban és ez addig működőképes, amíg az óceán közepi hátságokban olvadékok képződnek. A lemeztectonika kivételes jelenség. A naprendszer nagyobb szilikáttestei (Merkúr, Vénusz, Föld, Hold, Mars) közül egyedül csak a Földön van jelen. Abból kiindulva, hogy a lemeztectonika ritka, arra következtethetünk, hogy a modern stílusú lemeztectonika is csak egy korszak lehet bolygónk történetében, vagyis az uniformizmus elve itt sem érvényes, azaz nem mondhatjuk, hogy a jelenlegi tektonika kulcs a Föld korai történetének megismeréséhez és nem tudhatjuk, hogy ez a megközelítés a múltban milyen időnkig visszamenőleg használható (pl. ROLLINSON 2007). A modern stílusú lemeztectonikára jellemző petrotektonikai összletek ugyanis nem egy időben lettek gyakoriak, pl. az ofiolitok viszonylag későn ($\leq 1,0$ milliárd éve), a kékpalak és ultra magas nyomású képződmények csupán ($\leq 0,1$ milliárd éve), ezzel szemben a kontinentális riftek és ütközéses orogének ($\leq 2,0$ milliárd éve) és ív mögötti medencék ($\leq 2,7$ milliárd éve), lásd pl. CONDIE & KRÖNER (2008). A kontinentális kéreg, mely a szilikátboly-

gók közül szintén csak a Földön létezik, viszonylag későn, mintegy 2,7 milliárd évvel ezelőtt lett jelentős. Tekintettel arra, hogy a kontinentális kéreg kivonása a köpenyből a modern lemeztectonika működésének következtében indult meg, a modern lemeztectonika kezdete a különböző korú köpeny származású kőzetek geokémiai jellegeinek változásával megbízhatóan nyomonkövethető (pl. MARTIN et al. 2014). Legújabbban pedig CONDIE & SHEARER (2017) részletes tanulmányukban a Zr-Nb, Nb-Th, Th-Yb és a Nb-Yb inkompatibilis nyomelemarányokat vizsgálva állapította meg, hogy a 2,7 milliárd évnél idősebb óceáni bazaltok a primitív köpeny összetételével mutatnak hasonlóságot, míg az inkompatibilis elemekben dúsult köpeny fokozatos megjelenése 2 és 3 milliárd év között, a lemeztectonika beindulását jelzi bolygónkon. E szerzők szerint 3 milliárd évnél korábban stagnáló, egy lemeztectonikai rezsim létezhetett, amit az is alátámaszt, hogy holdi, marsi és az idősebb földi bazaltok e tekintetben hasonlítanak egymásra. Sokan azonban, pl. SOLOMATOV & MORESI (1996), ERNST (2007), STERN (2008) a stagnáló tektonikai rezsim mellett az archaikumban ún. proto-lemeztectonikát valószínűsítene, melyre a lokális jelleg és a sekély mélységű szubdukció volt jellemző. Hogy mi indította be a modern stílusú szubdukció kezdetét (esetleg egy aszteroida becsapódása miatt keletkezett sebhely vagy valami más), az ma még eléggé homályos, de egy biztos, a tektonikai rezsim megváltozása végső soron a Föld szekuláris lehűlésének a következménye. Ez azt is előre vetíti, hogy várhatóan valamikor a távoli jövőben a lemeztectonikát újból egy stagnáló egy lemez rezsim fogja felváltani (STERN 2008).

Még sok új eredményt sorolhatnánk, melyek a köpeny intenzív kutatásának köszönhetőek, de remélhetőleg a fenti példák is elég meggyőzőek ahhoz, hogy felismerjük, hogy az 1960-as évek során tudományágunkban paradigmaváltás történt. Nem lebecsülve azokat az eredményeket, amelyek még korábban láttak napvilágot, mégis elmondhatjuk, hogy a geológiának egy „naiv” korszaka zárult le. A „naivitás” abban állt, hogy jobb híján mindent egy „papírvékony” felszíni rétegből kellett értelmezni és a Föld térfogatának 84, tömegének 67%-át kitevő köpenyét nem tudták figyelembe venni. Persze itt is voltak WEGENERhez hasonló „próféták”, pl. Arthur HOLMES, aki már közel száz éve javasolta, hogy a kontinensek eltolódásának hajtómotorja a köpenykonvekció és a riftek köpenyfeláramlás helyei, valamint a lánchegységek azok a helyek, ahol a kőzetek visszasüllyednek a bolygó belsejébe (HOLMES 1931). De mint tudjuk, a profétákra a maguk idejében nem szoktak hallgatni...

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönettel tartozik két bírálónak, KOVÁCS István Jánosnak, HARANGI Szabolcsnak, valamint SZAKMÁNY Györgynek javító és kiegészítő tanácsokért, SZTANÓ Orsolyának szerkesztői munkájukért.

Irodalom — References

- ALLÈGRE, C. J. 1982: Chemical geodynamics. — *Tectonophysics* **81/3–4**, 109–132. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(82\)90125-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(82)90125-1)
- BOWEN, N. L. 1928: *Evolution of Igneous Rocks*. — Princeton University Press, New Jersey, 334 p.
- CONDIE, K. C. & KRÖNER, A. 2008: When did plate tectonics begin? Evidence from the geologic record. — *Geological Society of America special papers* **440**, 281–294. [https://doi.org/10.1130/2008.2440\(14\)](https://doi.org/10.1130/2008.2440(14))
- CONDIE, K. C. & SHEARER, C. K. 2017: Tracking the evolution of mantle sources with incompatible element ratios in stagnant-lid and plate-tectonic planets. — *Geochimica et Cosmochimica Acta* **213**, 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.06.034>
- DEMOUCHZY, S. & BOLFAN-CASANOVA, N. 2016: Distribution and transport of hydrogen in the lithospheric mantle: A review. — *Lithos* **240**, 402–425. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.11.012>
- DE ROEVER W. V. 1957: Sind die alpinotypen Peridotitmassen vielleicht tektonisch erfrachtete Bruchstücke der Peridotitschale? — *Geologische Rundschau* **46/1**, 137–146. <https://doi.org/10.1007/bf01802890>
- DREIBUS, G. & WANKE, H. 1987: Volatiles on Earth and Mars: A comparison. — *Icarus* **71**, 225–240. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(87\)90148-5](https://doi.org/10.1016/0019-1035(87)90148-5)
- EMBEY-ISZTIN A. 1976a: Felsököpeny eredetű lherzolitárványok a magyarországi alkáliolivinbazaltos, bazanitos vulkanizmus közetében. — *Földtani Közlemények* **106**, 42–51.
- EMBEY-ISZTIN, A. 1976b: Amphibolite/lherzolite composite xenolith from Szigliget, north of the Lake Balaton, Hungary. — *Earth and Planetary Science Letters* **31/2**, 297–304. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(76\)90223-5](https://doi.org/10.1016/0012-821x(76)90223-5)
- ERNST, T. 1935: Olivinknollen der Basalte als Bruchstücke alter Olivinfelsen. — *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-physik. Kl., IV, Geol. Miner.* **1**, 147–154.
- ERNST, W. G. 2007: Speculations on evolution of the terrestrial lithosphere–asthenosphere system—plumes and plates. — *Gondwana Research* **11/1**, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.02.007>
- FORBES, R. B. & KUNO, H. 1967: Peridotite inclusions and basaltic host rocks. — In: WYLLIE, P. J. (ed.): *Ultramafic and Related Rocks*, John Wiley Sons, Inc., New York, 328–337.
- FRECHEN, F. 1948: Die Genese der Olivinausscheidungen vom Dreiser Weiher (Eifel) und Finkenberg (Siebengebirge). — *N. Jb. f. Miner. Abh.* **79**, 317–406.
- GREEN, D. H. & RINGWOOD, A. E. 1967: The genesis of basaltic magmas. — *Contributions to Mineralogy and Petrology* **15/2**, 103–190. <https://doi.org/10.1007/bf00372052>
- HESS, H. H. 1962: History of Ocean Basins. — In: ENGEL, A. E. J., JAMES, H. L. & LEONARD, B. F. (eds): *Petrologic Studies: A Volume to Honor A. F. Buddington*. Geological Society of America, Boulder. 599–620.
- HIRSCHMANN, M. M. & KOHLSTEDT, D. 2012: Water in Earth's mantle. — *Physics Today* **65**, 40–45. <https://doi.org/10.1063/pt.3.1476>
- HOFMANN K. 1875–78: A déli Bakony bazalt-közetei. — *Magyar Királyi Földtani Intézet Évkönyve* **3**, 339–525.
- HOLMES, A. 1931: XVIII. Radioactivity and Earth Movements. — *Transactions of the Geological Society of Glasgow* **18/3**, 559–606.
- KAWABATA, H., HANYU T., CHANG, Q., KIMURA, J. I., NICHOLS, A. R. & TATSUMI, Y. 2011: The petrology and geochemistry of St. Helena alkali basalts: evaluation of the oceanic crust-recycling model for HIMU OIB. — *Journal of Petrology* **52/4**, 791–838. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egr003>
- KOCH S. 1966: *Magyarország ásványai*. — Akadémiai Kiadó, Budapest, 419 p.
- KOVÁCS, I., GREEN, D. H., ROSENTHAL, A., HERMANN J., O'NEILL, H. S. C., HIBBERSON, W. O. & UDVARDI, B. 2012: An experimental study of water in nominally anhydrous minerals in the upper mantle near the water-saturated solidus. — *Journal of Petrology* **53/10**, 2067–2093. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egs044>
- KUNO, H. 1959: Origin of Cenozoic petrographic provinces of Japan and surrounding areas. — *Bulletin of Volcanology* **20/1**, 37–76. <https://doi.org/10.1007/bf02596571>
- KURZ, M. D., JENKINS, W. J., HART S. R. & CLAGUE, D. 1983: Helium isotopic variations in volcanic rocks from Loihi Seamount and the Island of Hawaii. — *Earth and Planetary Science Letters* **66**, 388–406. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(83\)90154-1](https://doi.org/10.1016/0012-821x(83)90154-1)
- LACROIX, A. 1893: Les enclaves des roches volcaniques. — *Annales de l'Académie de Mâcon*. Protat frères. Mâcon, 710 p.
- LE ROUX, V., BODINIER, J. L., TOMMASI, A., ALARD O., DAUTRIA, J. M., VAUCHEZ, A. & RICHES A. J. V. 2007: The Lherz spinel lherzolite: refertilized rather than pristine mantle. — *Earth and Planetary Science Letters* **259/3**, 599–612. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.026>
- MARTIN, H., MOYEN, J. F., GUITREAU, M., BLICHERT-TOFT, J., & LE PENNEC, J. L. 2014: Why Archaean TTG cannot be generated by MORB melting in subduction zones. — *Lithos* **198**, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.02.017>
- MENZIES, M. A. 1983: Mantle ultramafic xenoliths in alkaline magmas: evidence for mantle heterogeneity modified by magmatic activity. — In: HAWKESWORTH, C. J. & NORRY, M. J. (eds): *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Shiva Publishing, Cheshire, U.K., 92–110.
- PORCELLI, D. & ELLIOTT, T. 2008: The evolution of helium isotopes in the upper mantle and the generation of isotopic anomalies. — *Earth Planetary Science Letters* **269**, 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.02.002>
- RINGWOOD, A. E. 1962: A model for the upper mantle. — *Journal of Geophysical Research* **67/2**, 857–867. <https://doi.org/10.1029/jz067i002p00857>
- ROLLISON, H. 2007: *Early Earth Systems: A Geochemical Approach*. — Malden, Massachusetts, Blackwell, 285 p. <https://doi.org/10.1017/s0016756808004640>
- ROSS, C. S., FOSTER, M. D. & MYERS, A. T. 1954: Origin of dunites and of olivine-rich inclusions in basaltic rocks. — *American Mineralogist* **39/9–10**, 693–737.
- SCHADLER, J. 1914: Zur Kenntniss der Einschlüsse in den südsteirischen Basalt-tuffen und ihrer Mineralien. — *Tschermak's min. pet. Mitt.* **32**, 485–511.

- SOLOMATOV, V. S. & MORESI, L. N. 1996: Stagnant lid convection on Venus. — *Journal of Geophysical Research: Planets* **101/E2**, 4737–4753. <https://doi.org/10.1029/95je03361>
- STERN, R. J. 2008: Modern-style plate tectonics began in Neoproterozoic time: an alternative interpretation of Earth's tectonic history. — *Geological Society of America Special Papers* **440**, 265–280. [https://doi.org/10.1130/2008.2440\(13\)](https://doi.org/10.1130/2008.2440(13))
- TURNER, F. J & VERHOOGEN, J. 1960: *Igneous and metamorphic petrology*. — McGraw-Hill Book Company, INC. Second Edition, New York Toronto London 694 p.
- TURNER, F. J. 1942: Preferred orientation of olivine crystals in peridotites. — *Transactions of the Royal Society of New Zealand* **72**, 280–300.
- VINE, F. J. & MATTHEWS, D. H. 1963: Magnetic anomalies over oceanic ridges. — *Nature* **199/4897**, 947–949. <https://doi.org/10.1038/201591a0>
- VITÁLIS I. 1911: A balatonvidéki bazaltok. In: LÓCZY L. (szerk.): A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. A balatonvidék bazaltos bombái. I. rész 6. fejezet. Budapest, 70 p.
- WAGER, L. R. 1958: Beneath the Earth's crust. — *Advancement of Science* **15**, 31–45.
- ZINDLER, A. & HART, S. 1986: Chemical geodynamics. — *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **14/1**, 493–571. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.14.050186.002425>

Kézitrat beérkezett: 2017. 04. 22.