

A köpeny-eredetű, a kozmikus anyagmintákra és a cirkumsztelláris környezetekre jellemző Mg/Si arányok komparatív vizsgálata

Comparative study of Mg/Si ratios for mantle-derived rocks, cosmic samples and circumstellar environments

FUTÓ Péter¹, GUCSIK Arnold²

¹Debreceni Egyetem, Kozmokémiai Kutatócsoport, Ásvány- és Földtani Tanszék, Debrecen

²Eszterházy Károly Katolikus Egyetem, Planetológiai és Műholdas Földmegfigyelő Kutatócsoport, Fizika Tanszék, Eger

Abstract

Xenoliths and other mantle-derived rocks show that the upper mantle is dominated by peridotite and Al-bearing phases that varies in compositional characteristics with increasing depth. The solar Mg/Si ratio is closely resemble to the chondritic values. The magnesium-to-silicon elemental ratio of the mantle-derived rocks is not only higher than solar, but they are thought to have a similar bulk Mg/Si ratios to that of the Solar System inner rocky planets depending on their formation location in the Solar nebula and their post-accretion processes.

Keywords: Mg/Si ratio, terrestrial planets, upper mantle, mantle-derived rocks, xenolith,

Kulcsszavak: Mg/Si arány, Föld-típusú bolygók, felső-köpeny, köpeny eredetű kőzetek, xenolit

1. BEVEZETÉS

A bolygóképződés alapját jelentő protoplanetáris-korongokban főként a C/O és Mg/Si elemarányok szabják meg a kialakuló kőzetbolygók, köztük a Föld-típusú (terresztrikus) bolygók ásványtani összetételét. A kondenzáció kémiai feltételeinek változékonysága következtében a kőzetbolygók változatos összetételűek lehetnek szerte a Világegyetemben. Az olyan protoplanetáris-korongokban ahol a C/O arány értéke nagyobb, mint 1 a keletkező kőzetbolygók főként szén alapú ásványokból (grafit, karbidok) épülnek fel [9]. A teljes Naprendszerre átlagolt C/O arány moláris értéke 0,54 [3], ezért a bolygórendszerünkben kialakult kőzetbolygók ásványtani összetételét már főként az Mg/Si arány szabja meg, ennél fogva azok kérgét és köpenyét túlnyomórészt szilikátok és oxidok alkotják. Az Mg/Si arány szoláris átlaga 1,05 [3], amelytől az egyes terresztrikus planetáris testekre jellemző Mg/Si arány kialakulásuk és evolúciójuk függvényében eltérő lehet.

A geokémiai földmodellek alapján a Föld felső-köpenyére magasabb Mg/Si arány jellemző, mint az alsó-köpenyre. A litoszféra köpenyhez tartozó zónájának peridotitos övétől kiindulva a felső-köpenyt és az átmeneti zónát az olivin és magasabb nyomású ásványfázisai (wadsleyit, ringwoodit), piroxének, gránátok és spinell építik fel. A felső-köpenyt alkotó ásványok arányai a pirolitos kémiai összetételnek megfelelően a mélység függvényében növekvő nyomás és hőmérsékleti értékek függvényében változnak. A 410 és 660 km mélységben húzódó átmeneti zóna felső határánál (~14 GPa) az olivin-(Mg,Fe)₂SiO₄ -magasabb nyomású fázisba, a wadsleyit-struktúrába megy át, amely fázis 520 km mélységben (~17,5 GPa) ringwoodit-struktúrába transzformálódik [6]. 660 km mélységben 24 GPa nyomásszinten a ringwoodit az alsó köpeny domináns részét alkotó perovszkit struktúrájú (Mg,Fe)SiO₃ és a magneziowüsztit (Mg,Fe)O fázisokba disszociál. A szintén perovszkit-struktúrájú kalcium-szilikát CaSiO₃ 18 GPa nyomáson alakul át gránáttól. 660 km körüli mélységzónában a gránát a ringwooditnál szélesebb nyomástartományban alakul át (Mg, Fe) (Al,Si)O₃ perovszkittá, mivel a perovszkit alumíniumtartalma az alsó-köpeny legfelső 50 km-es övében növekszik [6].

A Naprendszer többi terresztrikus bolygójának köpenyásványtani összetétele főként a rájuk jellemző, földitől eltérő Mg/Si arány miatt különbözik. Az ugyanazon szoláris nebula anyagából történő kialakulás ellenére az Mg/Si arány eltérése a bolygótetek összeállás előtti (preakkréciós) és utáni (posztakkréciós) folyamatai kémiai feltételeinek különbözőségéből adódik.

A Naprendszer kozmikus anyagai közül a CI-típusú szenes kondrit meteoritok elemgyakoriságai (Mg/Si=1.05) [3,12] közelítik legjobban a szoláris elemgyakoriságokat, tehát bolygórendszerünk eredeti

kémiai összetételét [13]. A teljes-szilikát Földnek (BSE) a felső-köpenyre jellemző kőzetekre a peridotitokra alapozott összetételében az Mg/Si arány eltér a kondritokétól [13,7,12,11]. Ezt az eltérést eredményezhette a szilícium magnéziumhoz képesti akkumulációja vagy a szilícium földmag anyagába történő inkorporációja [14,1]. A földköpeny kondritos meteoritokétól eltérő Si-izotóp összetétele is a szilícium jelenlétére utal a földmagban [4].

A szoláris nebula bolygótestek összeállása előtti fejlődési fázisában a Naptól különböző távolságokra, eltérő hőmérsékleteken különböző ásványok kondenzációja ment végbe. A Föld-típusú bolygók keletkezési zónájának Naptól kissé távolabbi, – hozzávetőlegesen a Vénusz és a Föld naptávolságában – a forszterit magasabb arányú kondenzációja miatt a szoláris nebula anyagát relative magasabb Mg/Si arány jellemezte, mint a zóna távolabbi régióiban. Ez az egyik oka annak, hogy a Marsra (a teljes bolygótestre) alacsonyabb Mg/Si arány jellemző, mint például a Földre vagy a Vénuszra.

2. A SZOLÁRIS ÉS AZ EXTRASZOLÁRIS Mg/Si ARÁNYOK

A megfigyelések szerint a belső bolygókra vonatkozó Mg/Si arányok összhangban vannak a keletkezésük során a különböző naptávolságban megvalósuló kondenzációs kémiai feltételekkel. A Földre és a Vénuszra jellemző átlagos Mg/Si arány a kondritos összetételnél magasabbnak mutatkozik, míg a távolabb kialakult Mars magnézium-szilícium aránya a kutatások szerint alacsonyabb lehet, mint a szoláris Mg/Si arány (1. táblázat), amely összhangban van az alkotó ásványok kondenzációjának a szoláris nebulára kidolgozott elméletével. A Marsnak, a Vénusznak és a Földnek egyaránt van fémes magja, melynek anyagában végbemehetett a szilícium-frakció egy részének inkorporációja. A három kőzetbolygó fémes magjának teljes bolygótesthez viszonyított tömegfrakciója eltérő és a maganyag szilíciumtartalma egyik esetben sem ismert pontosan, azonban a teljes bolygóra vonatkoztatott, kőzetvizsgálatokra alapozott Mg/Si arányok eltérései meglehetősen jól tükrözik a különböző bolygótestek teljes magnézium-frakciójának a teljes szilícium-frakcióhoz viszonyított arányát.

	Vénusz	Föld	Mars
Köpeny-Mg/Si	1,31 [17]	1,25 [12]	1,017 [20]
Köpeny-Mg/Si	1,35 [18]	1,16 [4]	0,97 [10]

1. táblázat: A belső bolygókra vonatkozó Mg/Si arányok

A csillagok és bolygók ugyanazon kémiai összetételű csillagközi anyagból alakultak ki, ezért egy csillag kémiai összetételéből következtetni lehet a körülötte kialakult bolygók legfőbb kémiai jellemzőire. A kőzetbolygók kémiai-ásványtani összetétele természetesen függ a protoplanetáris-korongon belüli keletkezési helyük kondenzációs kémiai feltételeitől és azon események sorától (kémiai differenciálódás, adott kémiai elemek többletét előidéző óriás impakt események) is, melyek az összeállásuk utáni (posztakkréciós) fejlődési szakaszban mentek végbe. A sztelláris elemgyakoriságok elemzése azonban mindenképpen hasznos információkat szolgáltat, mivel a csillagra jellemző és így a teljes bolygórendszerre átlagolt releváns elemarányok jelentik a legalapvetőbb kémiai feltételt a keletkező kőzetbolygók összetételének alakulásában.

A Nap galaktikus környezetében a szoláris átlagnál legtöbb esetben magasabb sztelláris Mg/Si arányok arra engednek következtetni, hogy e magnéziumban gazdagabb csillagok potenciális kőzetbolygóinak szilikátos övére a Földénél magasabb Mg/Si jellemző [16].

3. FÖLDI KÖPENY EREDETŰ KŐZETEK ÉS AZ Mg/Si ARÁNY

Az 1960-as években a lemeztektonika mellett a köpenyből származó kőzetek azonosítása forradalmasította a földtudományok fejlődését [5]. A 1950-es és 60-as évek fordulóján vált nyilvánvalóvá az a korábbi feltételezés is, hogy a peridotitos köpeny parciális olvadása okozza a bazaltos magmák keletkezését [19, 15].

A földköpeny kémiai összetételének becslésére irányuló kutatások egy része kozmokémiai, más részük pedig petrológiai megközelítésű. Mindkét megközelítés figyelembe veszi a földi és a meteoritikus mintákat, a kozmokémiai modellek azonban inkább a teljes Föld kémiai összetételére fókuszálnak, nem csak egyedül a köpeny összetételére. Jelen tanulmány mindkét típusú megközelítést figyelembe veszi és von le következtetéseket az adatok összehasonlítása révén.

A 2. táblázat a Föld különböző területeiről származó xenolitok analíziséből származó Mg/Si arányok átlagértékeit tartalmazza. A Jagoutz és mtsai [8] által a felső-köpenyre számított Mg/Si átlagérték alapján

képező adatok a kontinentális területeken gyűjtött alkáli bazaltokban található spinel-lherzolit zárványok vizsgálatából származnak, s a szubkontinentális köpenyanyag kémiai összetételéről szolgáltatnak információkat.

Felső-köpeny-Mg/Si	1,26 [8]
Felső-köpeny-Mg/Si	1,22 [2]

2. táblázat: a Föld különböző területeiről származó xenolitok analizéséből származó Mg/Si arányok átlagértékei

A földköpenyből származó kőzetek egy része különböző mértékű átalakuláson ment keresztül. A Föld különböző területeiről származó köpenyeredetű kőzetek magnézium-szilícium aránya azonban nagyon hasonló, az Mg/Si arány molban kifejezett értéke a legtöbb esetben 1,2 -1,3 közötti.

4. KÖVETKEZTETÉS

A Föld különböző területeiről gyűjtött köpenyeredetű kőzetek mintáira jellemző Mg/Si arányok meglepően hasonló értékek, a szubkontinentális litoszféra és az óceáni medencék ultramafikus kőzetei esetében is. A felső-köpenyre jellemző Mg/Si arányok pedig minden esetben magasabbnak adódnak a szoláris Mg/Si arány átlagát (Mg/Si=1,05) legjobban közelítő CI-típusú szenes kondrit meteoritokra jellemző Mg/Si arányhoz. Ennek fő oka a CI-kondritok szülőégitestjei, valamint például a Föld, mint kőzetbolygó akkréciója szoláris nebulán belüli helyének eltérő kondenzációs kémiai feltételei mellett a kőzetbolygók kémiai differenciálódásában rejlik.

A galaktikus környezetünk Naphoz hasonló csillagainak Mg/Si arányai a megfigyelések alapján legtöbb esetben jellemzően magasabbak, mint a Naprendszerre jellemző átlagérték. Mivel a bolygótestek kialakulását és fejlődését meghatározó természeti folyamatok egyetemesek a Világegyetemben, a bolygóképződés kémiai feltételeinek különbözőségei a kialakuló kőzetbolygók kémiai-ásványtani összetételében is megmutatkoznak. A gondolatmenetet tovább folytatva ez egyúttal arra utal, hogy galaktikus környezetünk legtöbb potenciális kőzetbolygója esetében a felső köpeny Mg/Si arány átlaga is magasabb lehet a szoláris kőzetbolygókénál, így például a Föld felső-köpenyére jellemző átlagértéknél. A felső-köpeny magasabb Mg/Si aránya pedig a magnéziumban gazdag ásványi komponensek, főként az olivin és magasabb nyomású polimorfjainak a piroxénekhez képesti magasabb arányát eredményezi.

Irodalmi hivatkozások

- [1] ALLÉGRE, C.J., POIRIER, J.P., HUMLER, E., HOFMAN, A.W. 1995: The chemical composition of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, **134**, 515–526.
- [2] ANDERSON, D.L. 1983. Chemical Composition of the mantle. *Journal of Geophysical Research*, **88**, B41-B52.
- [3] ASPLUND, M., GREVESSE N., SAUVAL J. 2005: The solar chemical composition. *Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, **336**, 25.
- [4] DAUPHAS, N., POITRASSON, F., BURHARDT, C., KOBAYASHI, H., KUROSAWA, K. 2015: Planetary and meteoritic Mg/Si and $\delta^{30}\text{Si}$ variations inherited from solar nebula chemistry. *Earth and Planetary Science Letters*, **427**, 236–248.
- [5] EMBEY-ISZTIN A. 2017. A köpeny eredetű kőzetek felismerésének története és szerepe a geológiai gondolkodás fejlődésében. *Földtani Közlemény*, **174/4**, 415–422.
- [6] FROST, D. J. 2008: The upper mantle and transition zone. *Elements*, **4**, 171–176.
- [7] HART, S.R., ZINDLER A. 1986: In search of a bulk Earth composition. *Chemical Geology*, **57**, 247–267.
- [8] JAGOUTZ, E., PALME, H., BADDENHAUSEN, H., BLUM, K., CENDALES, M., DREIBUS, G., SPETTEL, B., LORENZ, W., WÄNKE, H. 1979: The abundances of major, minor and trace elements in the Earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules. *In: Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston, Texas, USA. 10. kötet.
- [9] KUCHNER, M. J., SEAGER S. 2005: Extrasolar carbon planets. arXiv:astro-ph/0504214.
- [10] LODDERS, K., FEGLEY, Jr., B. 1997: An oxygen isotope model for the composition of Mars. *Icarus*, **126**, 373–394.
- [11] LYUBETSKAYA, T, KORENAGA, J. 2007: Chemical composition of Earth's primitive mantle and its variance: 1. Method and results. *Journal of Geophysical Research*, **112**, B03211.
- [12] MCDONOUGH, W. F., SUN S. S. 1995: The composition of the Earth. *Chemical Geology*, **120**, 223–253.
- [13] PALME H., O'NEILL, H.St.C 2014: 3.1. Cosmochemical Estimates of Mantle Composition. 1–39. *In: Treatise on Geochemistry. 2nd Edition*. Szerk.: TUREKIAN, K. K., HOLLAND, H. D. Elsevier, USA.

- [14] POIRIER, J.P. 1994: Light elements in the Earth's outer core: a critical review. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **85**, 319–337.
- [15] RINGWOOD, A. E. 1962: A model for the upper mantle. *Journal of Geophysical Research*, **67**, 857–867.
- [16] SPAARGAREN, R. WANG, H.; MOJZSIS, S.; BALLMER, M.; TACKLEY, P. 2020. Exoplanet bulk silicate composition as a function of host stellar elemental abundances, and its effects on long-term planetary evolution. *EGU (European Geosciences Union) General Assembly 2020*, EGU2020-20378, Virtual conference, 4-8. május 2020.
- [17] TRØNNES, R. G., BARON, M.A., EIGENMANN, K.E., GUREN, M.G., HEYN, B.H., LØKEN, A., MOHN C.E. 2019: Core formation, mantle differentiation and core-mantle interaction within Earth and the terrestrial planets. *Tectonophysics*, **760**, 165–198.
- [18] UNTERBORN, C. T., DISMUKES, E.E., PANERO, W.R. 2016: Scaling the Earth: A sensitivity analysis of terrestrial exoplanetary interior models. *The Astrophysical Journal*, **819**, 32.
- [19] WAGER, L. R. 1958: Beneath the Earth's crust. *Advancement of Science*, **15**, 31–45.
- [20] YOSHIZAKI, T., McDONOUGH, W. F. 2020: The composition of Mars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **273**, 137–162.