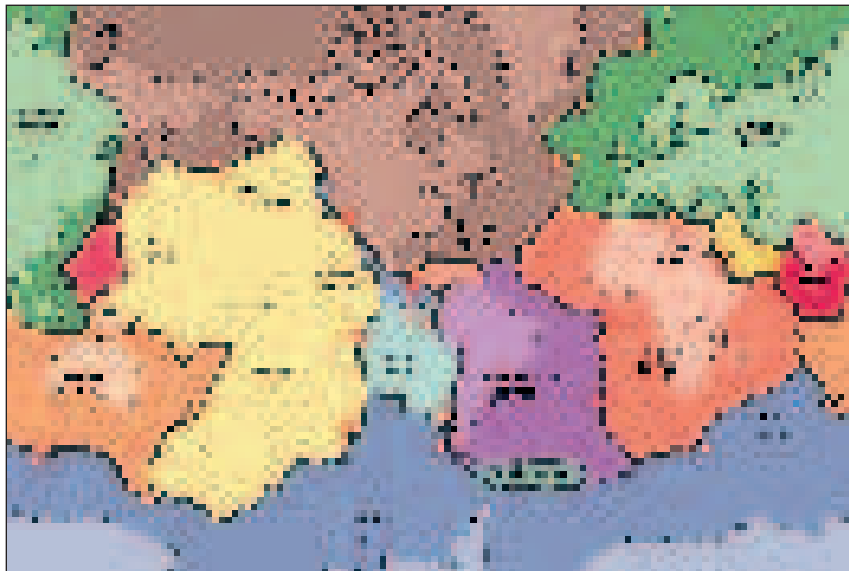


GALSA ATTILA–SÜLE BÁLINT

A lemeztektonika motorja

Áramlások a földköpenyben

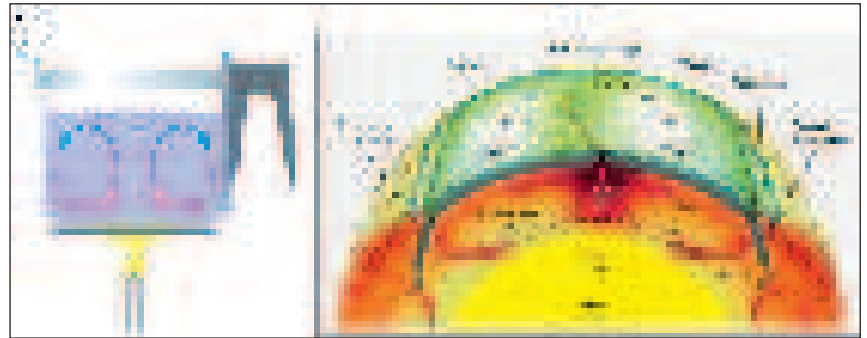
Alfred Wegener egy évszázaddal ezelőtt felvázolt kontinensvándorlási elmélete – a korabeli földtudomány elutasító magatartása ellenére – a jelenkori középiskolás földrajztan-könyvek meghatározó részévé vált. Nem meglepő tehát azon állítás, hogy a szárazföldek elhelyezkedése a földtörténeti múltban eltért a maitól, melynek segítségével sokkal egyszerűbben magyarázhatók az egymástól több ezer kilométerre fekvő kontinenseken fellelhető hasonló közettípusok, állatfajok, fossziliák stb. [Horváth 2012a, 2012b]. Természetesen a kontinensek vándorlása egy nagyobb rendszer, a Föld szilárd, ámbar nem egyseges burkát képező kőzetlemezek, pontosabban litoszféralemezek relatív mozgásából fakad. Mindez azt jelenti, hogy a szilárd és merev litoszféralemezek egymáshoz képest néhány cm/éves sebességgel mozognak (1. ábra), egymástól



1. ábra. A Föld felszínét borító litoszféralemezek és relatív mozgásuk

távolodnak (pl. Észak-amerikai- és Eurázsiai-lemez), vagy éppen egymásnak ütköznek (Csendes-óceáni- és Ausztrál-lemez).

nulása van. A sekély- és mélyfészktű földrengések eloszlása, a vulkáni ívek elhelyezkedése, a magma geokémiai összetétele, a mélytengeri aljzat topográfiája és szabályos mág-



2. ábra. Termikus konvekció sematikus ábrázolása [<http://web.mst.edu/~sgao/g51/plots/>] és egy kezdeti elképzelés a földköpenyben való megnyilvánulásáról [<http://massovia-pomerania.blogspot.hu/2009/11/massovian-land-in-southern-seas.html>]

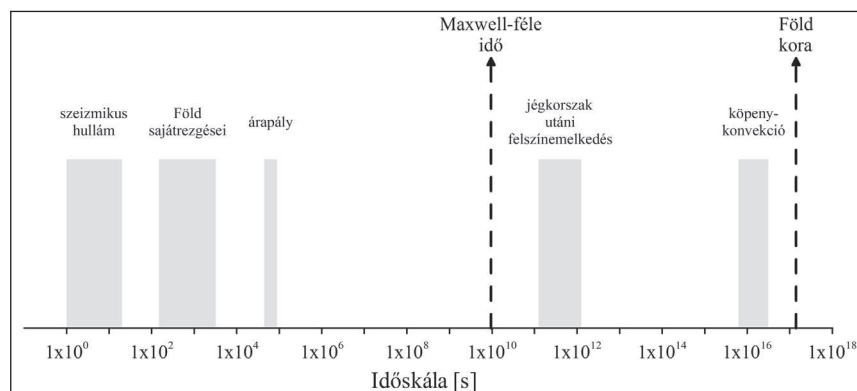
A lemezek mozgása és határa a mai GPS-technikával már pontosan megállapítható, ráadásul a távolodó (divergens) és ütköző (konvergens) lemezeknek számos felszíni geofizikai, geológiai, geokémiai megnyilván-

nesezettsége, a hóáram- és geoidanomáliák eloszlása együttesen mind azt tanúsítja, hogy az óceáni litoszféralemezek az óceáni hátságoknál születnek. A hátságoktól távolodva hűlnek, sűrűségük nő, míg nem 100–200 millió év múltán alábuknak (szubdukálódnak) a köpenybe a kisebb sűrűségű kontinentális lemez alá.

Vajon milyen erő mozgatja e hatalmas méretű és tömegű kontinenseket? Mi okozhatta a 200 millió évvel ezelőtt létező szuperkontinens, a Pangea feldarabolódását? Mi az az erőhatás, mely képes felgyúrti a legnagyobb hegységrendszereket, okozza a földrengések túlnyomó többségét és előidézi a vulkáni tevékenység zömét? Annak ellenére, hogy a tudomány egzakt, minden részletre kiterjedő választ a mai napig nem tud adni e kérdésekre, mégis érdemes összegezni az utóbbi egy-két évtizedben született eredményeket.

A termikus konvekció és a földköpenyben zajló áramlások kapcsolata

Habár a termikus konvekciót mint fizikai jelenséget egy meglehetősen bonyolult nemlineáris parciális differenciálegyenlet-rendszer írja le, mégis kvalitatíve, a folyamat lényegét tekintve egyszerűen elmagyarázható. Ha egy edényben vizet melegítünk, akkor a víz alul felmelegszik, a



3. ábra. A földköpenyre jellemző Maxwell-féle idő és néhány geodinamikai szempontból fontos időskála [Cserepes 2002]

mányban magasabb legyen a hőmérséklet, ami a hőtáguláson keresztül instabilitáshoz, majd áramláshoz vezethet. Ez a földköpenyben biztosított, hiszen a felszíni hőmérsékletnél a köpeny-mag határon hozzávetőlegesen 3500–4000 °C-kal melegebb van [Tackley 2012]. Meg kell jegyezni azonban, hogy a köpeny-áramlást hajtó hőmennyiség elsősorban nem a Föld magjából származik. Különböző számítások alapján a felszíni hőáram mintegy 50–80%-a – a köpeny szempontjából – belső eredetű, azaz a hő nem alulról, a magból lép be, hanem magából a köpenyből származik. Utóbbi magában foglalja a köpenyben lévő radioaktív izotópok (döntően ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) bomlásából, illetve a köpeny hűléséből fakadó hőt [Jaupart et al. 2007]. Vagyis a földköpenyben zajló termikus konvekció olyan áramlási rendszer, melyet részben alsó, részben belső fűtés tart fenn.

Az áramló anyag útját végigkövetve a termikus konvekció felszíni, horizontális ága kétségtelenül megfeleltethető a lemeztektonikának (2b. ábra). A hideg lebukó áramlatokat a mélytengeri árkoknál alábukó óceáni litoszféralemezek

hőtágulás miatt sűrűsége csökken, ezért benne felhajtóerő ébred, és felemelkedik (2a. ábra). A felszínhez érve a meleg folyadék horizontálisan mozog a hideg felszín mentén, így lehűl, összehúzódik, sűrűsége megnő, és – a negatív felhajtóerő miatt – alábukik az edény aljág. A meleg alj mentén horizontálisan mozogva hőmérséklete emelkedik, kitágul, s a cirkuláció kezdődik előlről. Ezt a hőtranszport körfolyamatot, mikor az áramlást az inhomogén hőmérséklet-eloszlás idézi elő, nevezzük termikus konvekciónak.

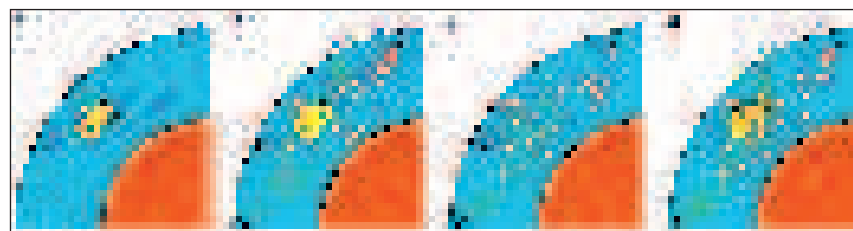
A földköpeny – mely a héjszerű kéreg alatt 2890 km mélységig terjed, s így a Föld legnagyobb térfogatú és tömegű tartománya – azonban nem folyadék halmazállapotú. Legalábbis hétköznapi értelemben. Ismert, hogy a köpeny a rövid ideig fennálló feszültségre rugalmas testként reagál, elasztikusan viselkedik, azonban a hosszú ideig tartó behatásokra folyadékszerű, azaz viszkózus deformációval válaszol. Az ilyen testet viszkoelasztikus testnek nevezzük, s az elasztikus és viszkózus deformációk hányadosaként definiálható ún. Maxwell-féle idővel jellemezzük,

$$\tau_M = \frac{\eta}{\mu} \cong \frac{2 \cdot 10^{21} \text{ Pas}}{2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}} \cong 300 \text{ év},$$

ahol η és μ a köpenyre jellemző dinamikai viszkozitást és nyírási moduluszt jelöli. Amennyiben a köpenyre ható feszültség karakterisztikus ideje jóval kisebb, mint τ_M (pl.: a földrengések által keltett rugalmas hullámok és a Föld sajátrezgései), a köpeny rugalmas testként viselkedik. Ugyanakkor, ha a köpeny erő behatás ideje jóval nagyobb, mint τ_M (pl.: jégkorszak utáni felszínemelkedés, köpenykonvekció), a köpeny folyadékszerű választ ad (3. ábra). Mivel a köpenykonvekció karakterisztikus ideje – a lemeztektonikai sebességek alapján becslülve – több 100 millió év, ezért a

köpenykonvekció szempontjából a földköpeny folyadéknak tekinthető.

Fontos néhány szót ejteni arról is, hogyan folyik a köpeny. Anélkül, hogy részletekbe bocsátkoznánk, Gordon [1965] megállapította, hogy az olvadáspontjához közeli hőmérsékletű, de még szilárd anyag kis feszültségek hatására is folyadékszerű deformációt mutat geológiai időskálán. Az ilyen deformációt creep-folyásnak (creep deformation,



4. ábra. A szeizmikus tomográfia működésének elvi vázlata egy negatív szeizmikus sebességanómália esetén. (a) Azon hullámutak, melyek áthaladnak az anomálián, a vártnál Δt -al később érnek el az obszervatóriumig. (b) Sok rangús sok hullámbeérkezését regisztrálják. (c) Természetesen az anomália nagysága és kiterjedése a valóságban nem ismert. (d) A regisztrált hullámbeérkezések alapján következtetni lehet az anomáliára. Általában minél nagyobb az adatok száma és pontossága, az anomália annál jobban feltérképezhető

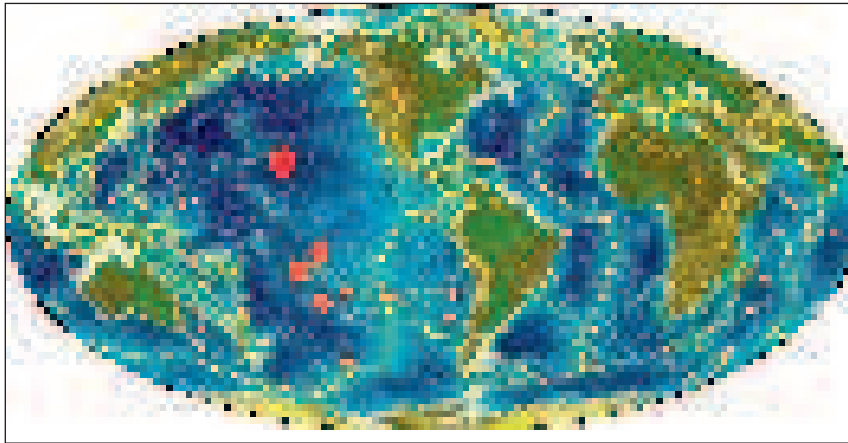
néhol kúszófolyásnak szokták fordítani) nevezzük, melyet a kristályhibák terjedése (migrációja) idéz elő. A creep-folyást kiválthatja ponthibák (diffusion creep), vagy vonalhibák (dislocation creep) terjedése a kristályszerkezetben. A földköpeny folyadékszerű deformációjáért valószínűleg elsősorban a diffúziós folyás a felelős, de a felső köpeny sekélyebb tartományaiban, ahol a nyíró feszültség jelentősebb, a diszlokációs folyás akár dominánssá is válhat. Azaz a földköpenyben zajló folyadékszerű áramlás a szilárd fázisú kristályok rács-hibáinak terjedésén keresztül történik.

A termikus konvekció megindulásának egyik alapfeltétele, hogy a mélyebb (nagyobb nehézségi potenciálú) tarto-

representálják, melyek esetenként elérik a köpeny-mag határt. Ezen alsó határ felett történő laterális elmozdulásról még aránylag keveset tudunk. Kézenfekvőnek tűnik azon gondolat, hogy a termikus konvekció fő felszálló ágai a szét-tartó óceáni hátságok alatt találhatóak, ennek azonban ellentmondanak a geofizikai megfigyelések.

A köpenykonvekció fő felszálló áramlatai: a köpenyhőoszlopok

A geofizika, pontosabban a szeizmológia által kifejlesztett szeizmikus tomográfia jelenleg a Föld mélyének elsődleges megismerési formája. Lényege,

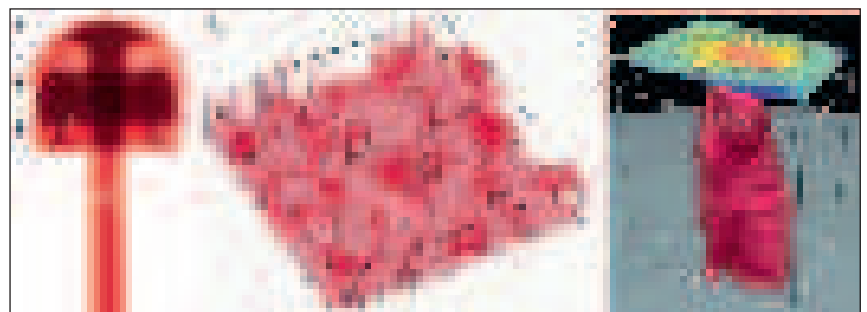


5. ábra. A forró foltok eloszlása a Föld felszínén. A földfelszín és a tengerfenék topográfiája tektonikai lemezhatárokkal [forrás: *National Geophysical Data Center*], valamint a forró foltok elhelyezkedése [Steinberger 2000]. A körök mérete arányos a köpenyoszlopok számított tömegfluxusával

hogy a kipattanó nagyobb rengések által gerjesztett rugalmas hullámok átjárják a Föld belsejét, s a felszínen elhelyezkedő szeizmológiai obszervatóriumok regisztrálják a hullámok beérkezési idejét. Ennek alapján megállapítható, hogy mely hullámutak mentén halad a vártnál gyorsabban, s hol lassabban a rugalmas hullám (4. ábra). Egyszerre sok (esetenként akár több 100 000) rengés különböző helyeken történő beérkezését mérve a Föld – vagy egyes tartományai, mint pl. a köpeny – átvilágíthatók, a szeizmikusan gyors, illetve lassú háromdimenziós tartományok körülhatárolhatók. A szeizmikus tomográfia esetén legtöbbször az a feltevéssel élünk, hogy a szeizmikus anomáliákat hőmérsékletanomáliák okozzák. Tehát a szeizmikusan gyors területek hideg és merev, ezért leszálló zónákat reprezentálnak, míg a szeizmikusan lassú területek meleg, ezért felemelkedő tartományai a köpenynek. A módszer az orvosi gyakorlatban használt számítógépes tomográfiahoz (CT) hasonló elven működik, azzal a nehezítéssel, hogy esetünkben sem a forrás (föld-rengés kipattanásának helye, ideje), sem a rugalmas hullám által bejárt út (inhomogén, anizotróp közegben nem egyenes vonalú) nem ismert tökéletesen.

Az óceáni hátságok alatti területeket leképező szeizmikus tomográfia egyértelműen kimutatja, hogy a tapasztalt negatív szeizmikus anomália (benne a környezeténel lassabban terjed a rugalmas hullám, tehát vélhetően meleg, ezért felemelkedő) sekély, mélységbeli kiterjedése nem több néhány 100 km-nél. Mindezt azt jelenti, hogy az itt található köpenyfeláramlások passzív jellegűek, azaz csak az egymástól távolodó lemezek

közötti űrt töltik ki alacsony viszkozitású asztenoszféra anyaggal. A sekély és passzív feláramlásban a csökkenő nyomás miatt a köpeny legalacsonyabb olvadáspontú bazaltos komponense megolvad, mely a hideg felszín közelébe érve „hozzáfagy” a távolodó lemezekhez. Az óceáni lemezek az óceáni hátságnál születnek. Mivel azonban a lebukó lemezek esetenként a köpeny–mag határt is elérik, ezért – a tömegmegmaradás miatt – létezniük kell a teljes köpenyen keresztülemelkedő anyagáramlatoknak is. Az óceáni hátságok alatti sekély feláramlások ezeknek nem felelnek meg.



6. ábra. Köpenyhőoszlopok (a) laboratóriumi [Campbell és O’Neil 2012] és (b) háromdimenziós numerikus modellekben (szerzők számítása), valamint (c) a szeizmikus tomográfia által feltárt negatív sebességanomália Izland alatt [Wolfe et al. 1997]

W. J. Morgan [1971] vetette fel először, hogy a felszíni forró foltok (hot spots) alatt a köpeny hengerszerűen emelkedő meleg anyagáramlatai, az úgynevezett köpenyhőoszlopok (mantle plumes) vannak. Néhány jól ismert példán kívül (Hawaii, Izland, Húsvét-sziget, Tahiti stb.) jelenleg nem dönthető el egyértelműen, hogy pontosan mely felszíni képződmény tekinthető forrófolt-

nak. Általában felszíni kiemelkedéssel, pozitív hőáram és geoidanomáliával jellemezhetők, vulkanizmusuk nem kötődik feltétlenül lemezhatárhoz, óceánokban sokszor vulkáni szigetekként jelentkeznek. A felszíni forró foltok pontos száma meglehetősen bizonytalan, de a legtöbb szerző között konszenzus mutatkozik abban, hogy a Föld felszínén hozzávetőlegesen 40–50 forró folt létezik (5. ábra).

Később Bercovici és társai [1989] kijelentették, hogy a köpenyhőoszlopok a földköpenyben zajló termikus konvekció fő felszálló ágai. Mind laboratóriumi, mind számítógépes modellekben megpróbálhatunk olyan fizikai paraméter-eloszlást előállítani, mely – mai tudásunk alapján – a lehető legjobban megfelel a köpenyben uralkodó viszonyoknak. Az ilyen modellekben kialakuló termikus konvekció felemelkedő ágai közel vertikális tengelyű, hengerszerű, meleg képződmények, tehát köpenyhőoszlopok (6. ábra). A laboratóriumi és numerikus modelleken túlmenően a legközvetlenebb bizonyítékot a köpenyhőoszlopok létezésére ismét a szeizmikus tomográfia szolgáltatja. A köpenyhőoszlopok relatíve vékonyak, (~100 km átmérő) és kis hőmérséklet-növekményűek (~100 °C), ezért létezésüket a szeizmológia csak az utóbbi évtizedben hitelesítette. Montelli és társai [2006] mintegy 32 forró folt alatt tártak fel negatív szeizmikus anomáliát, melyek sok esetben egészen a köpeny–mag

határig voltak nyomozhatók. Ráadásul a forró foltoknál feltörő magma izotóp és nyomelem geokémiai vizsgálatai is megerősítik, hogy forrástartományuk eltér az óceáni hátságnál felszínre kerülő bazaltokétól, valószínűsíthetően nagyobb mélységből származnak.

A feláramlások komplexitását növeli a szeizmikus tomográfia által Afrika és a Pacifikum alatt kimutatott nagykiterje-

désű alacsony nyíróhullám sebességgel jellemzett két tartomány (LLSVP: Large Low Shear Velocity Province). A nyíróhullám-sebesség jelentős (2–4%-os) csökkenése, melyet nem kísér a nyomáshullámnak érdemi lassulása, valamint az LLSVP éles határa azt valószínűsíti, hogy ezen tartományok kémiai összetételükben is eltérnek a köpeny többi részétől. A különböző inverziós és numerikus számítások alapján sűrűségük 2–3%-kal meghaladja a felette elterülő

sűrűbb tartományt (LLSVP). Az összetételében sűrű tartomány felszínéről kisebb hőmérsékletnövekménnyel bíró köpenyoszlopok emelkednek, melyek sűrű anyagot sodornak magukkal ezáltal magyarázva a forrófoltok eltérő geokémiai jellegét. A köpeny globális áramlási rendszere a sűrű, meleg alsó rétegben is áramlást, belső konvekciót idéz elő. Ezen áramlás felszálló ágai a köpeny legmagasabb hőmérsékletű részei, ahol a köpenyanyag 10–30%-a is olvadt fázisban található, mely megerősíti

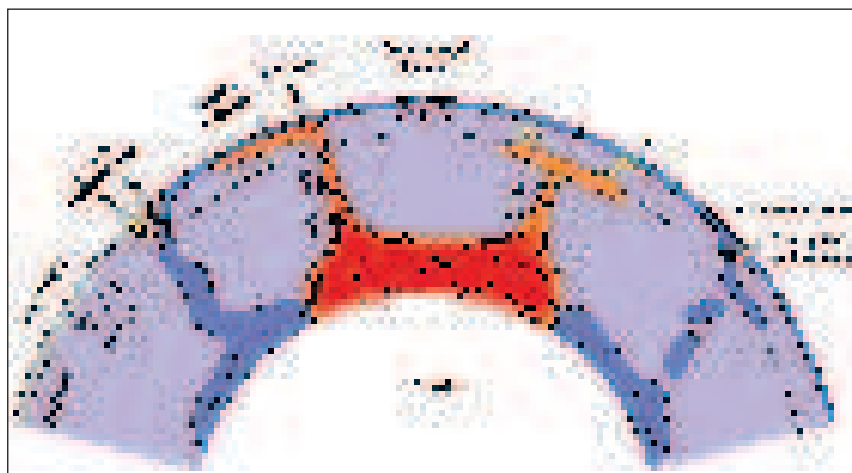
közölni: számos kiömlési bazalt kora – melyre sok kutató a felszínre érő köpenyoszlop által szállított mély köpenyanyagként tekint – és az óceánok felnyílásának ideje egybeesik. 🏠

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a TÁMOP 4.2.4.A/1-11-1-2012-0001 Nemzeti Kiválóság Program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalom

- Wegener, A., 1912. Die Entstehung der Kontinente. Geol. Rundschau, 3:276–292.
- Horváth F., 2012a. 100 éves a kontinensvándorlás elmélete, első rész. Természet világa, 143/11, 437–439.
- Horváth F., 2012b. 100 éves a kontinensvándorlás elmélete, második rész. Természet világa, 143/11, 496–499.
- Cserepes L., 2002. Convective motions in the mantle. Acta Geod. Geoph. Hung., 37/1, 3–27.
- Gordon, R. B., 1965. Diffusion creep in the Earth's mantle. J. Geophys. Res., 70, 2413–2418.
- Tackley, P. J., 2012. Dynamics and evolution of the deep mantle resulting from thermal, chemical, phase and melting effects. Earth-Sci. Rev., 110, 1–25.
- Jaupart, C., Labrosse, S., Mareschal, J.-C., 2007. Temperatures, heat and energy in the mantle of the Earth. In: Treatise on Geophysics, vol. 7, 253–303.
- Morgan, W. J., 1971. Convection plumes in the lower mantle. Nature, 230, 42–43.
- Bercovici, D., Schubert, G., Glatzmaier, G. A., 1989. Three-dimensional spherical models of convection in the Earth's mantle. Science, 244, 950–955.
- Montelli, R., Nolet, G., Dahlen, F. A., Masters, G., 2006. A catalogue of deep mantle plumes: New results from finite-frequency tomography. Geochim. Geophys. Geosyst., 7/11, doi:10.1029/2006GC001248.
- Campbell, I. H., O'Neil, H. St C., 2012. Evidence against a chondritic Earth. Nature, 483, 553–558.
- Wolfé, C. J., Bjarnason, I. Th., VanDecar, J. C., Salamon, S. C., 1997. Seismic structure of the Iceland mantle plume. Nature, 385, 245–247.
- Thorne, M. S., Garnero, E. J., Grand, S. P., 2004. Geographic correlation between hot spots and deep mantle lateral shear-wave velocity gradients. Phys. Earth Planet. Inter., 146, 47–63.
- Steinberger, B., 2000. Plumes in a convecting mantle: Models and observations for individual hotspots. J. Geophys. Res., 105, 11127–11152.



7. ábra. A köpeny–litoszféra konvekciós rendszernek egy lehetséges megvalósulása

köpenyét, melynek következtében visszafogják, stabilizálják az áramlási rendszert. A tartomány nagyobb sűrűsége és alacsonyabb nyíróhullám-sebessége az LLSVP magasabb vastartalmára utal. Thorne és társai [2004] kimutatták, hogy a felszíni forró foltok elsősorban ezen LLSVP tartományok szélei felett helyezkednek el.

A köpenykonvekció és a lemeztectonika mint egységes rendszer

A fentebb leírtakból nyilvánvaló, hogy az óceáni lemezek részt vesznek a földköpeny konvekciójában, hiszen nagyobb sűrűségüknél fogva a mélytengeri árkoknál alábuknak a köpenybe (7. ábra). A szubdukáló lemezek azonban nem minden esetben süllyednek le a köpeny-mag határig, olykor elhajlanak, és felfekszenek — legalábbis ideiglenesen — a felső és alsó köpenyt elválasztó 660 km mélységben húzódó határra. Ugyanis ezen ásványtani fázishatár, mely a köpeny fő ásványi összetevőjének, az olivinnek az endoterm jellegű átmenete, gátolja az átáramlást. A mag felszínéig lebukó lemezek erősen deformálják a köpeny mélyebb tartományában található, kémiai összetételében 2–3%-kal

a nagyobb vastartalmat feltételező elképzelt. A köpenyhőoszlopok nem minden esetben képesek „áttörni” a 660 km mélységű fázishatáron, egyesek ideiglenesen, vagy véglegesen az alsó köpenyben rekednek. A felső köpenybe átjutó feláramlások képesek „átégetni” a litoszférát, főképp a vékonyabb óceáni litoszférát, így vulkáni hegyláncot hozva létre a felettük elhaladó óceáni lemezen (pl.: Hawaii-Emperor-hegylánc). A mélyköpenyből felhozott anyag jelentős része azonban nem közvetlenül jut a felszínre, hanem az alacsony viszkozitású asztenoszférában csatornázódik, s hatékony keveredés után érheti el a felszínt az óceáni hátságnál.

Talán sikerült érzékeltetni, hogy a köpeny–litoszféra áramlási rendszer általunk leegyszerűsített változata is meg lehetően komplexnek mutatkozik. Egy ilyen körfolyamat esetén természetesen kérdés, hogy a köpenyhőoszlopok törik-e fel a szilárd litoszférát, és indítják be a lemeztectonikát. Vagy éppen fordítva? A hideg óceáni lemezt a saját súlya húzza alá a köpenybe, ezáltal felszakítva a litoszférát, s így a köpenyoszlopoknak nincs érdemi szerepük a lemeztectonika szempontjából? Valójában mindkét elképzelt mellett számos érv és ellenérv sorakoztatható fel. Itt csak egyetlen adatot szeretnénk