

# HORVÁTH FERENC

## 100 éves

### a kontinensvándorlás elmélete

#### ELSŐ RÉSZ

**SZ**akkörökben jól ismert, hogy Alfred Wegener híres könyve, *A kontinensek és óceánok kialakulása* először 1915-ben jelent meg. Ezt 1929-ig még három, átdolgozott német és négy idegen nyelvű kiadás követte. Valójában azonban az elmélet első nyilvános bemutatására 1912. január 6-án került sor a német Földtani Társulat frankfurti ülésén *A földkéreg nagyformáinak (a kontinenseknek és az óceánoknak) a kialakulása geofizikai adatok alapján* című előadás keretében. Ezt január 10-én Marburgban (Berlin melletti egyetemi kisváros) egy másik előadás követte *A kontinensek horizontális elmozdulása* címmel. Még abban az évben két publikáció is napvilágot látott: az egyik egy földrajzi közleményekben, míg a másik a német geológusok vezető szaklapjában jelent meg (Wegener 1912a,b).

Indokoltnak látszik tehát a 2012-es évet a kontinensvándorlási elmélet centenáriumának tekinteni. Különösen megalapozottá válik ez a megállapítás, ha az 1912-es munkákat újraolvassuk, mert meglepve tapasztaljuk, hogy nem zseni, korai próbálkozásokkal állunk szemben, hanem ennek a forradalmian új elméletnek a legfontosabb alapítói már akkor megszülettek Wegener fejében. Meglepetésünk csodálattá változik, midőn az 1912-es munkákban olyan megállapításokat is találunk, amelyek a későbbi könyvekből kimaradtak, de mai ismereteink fényében zseniálisan jó elképzeléseknek minősíthetők.

A következőkben mindezt tételiesen is bemutatjuk, de először áttekintjük azt, hogy XX. század elején mik voltak a globális földtudomány legfontosabb koncepciói és megoldatlan problémái. Csak az akkori a tudományos korszaknak az ismeretében érthetjük meg azt, hogy egy az elméleti és kísérleti meteorológiában elismert szakember milyen mértékben rázta meg az akkori geológusokat és geofizikusokat a tőlük „elsett” megfigyelések és elméletek előítéletek nélküli átgondolásával, és egy új geodinamikai modell megalkotásával.

#### A Föld hűlése és kora

A Kant–Laplace-elmélet alapján már a XIX. század elején tudtuk, hogy a Naprendszer kialakulása egyetlen grandiózus kozmogóniai folyamat volt, amelynek során „hideg” csillagközi porból és gázból növekedtek össze a bolygók. A kőbolygók kialakulása során az anyagok gravitációs összetömörödése és az így koncentrálnó természetes radioaktív elemek bomlása olyan mennyiségű hőt termelt, amely ezeket a bolygókat rövid idő alatt izzó olvadék gömbé változtatta. Ez az „ősi hőmennyiség” jórészt még ma is megvan a Föld belsejében, de állandóan csökken, mert a felszínről kisugárzódik a világűrbe. Nyilvánvaló tehát azt feltételezni, hogy a Föld és bolygótestvérei korai megolvadásuk óta folyamatosan hűlnek. Már Newton sejtette, de Fourier a hővezetés differenciálegyenleteinek levezetése alapján már 1827-ben tudta,

hogy az izzó gömbtől a mai állapotba való eljutásig eltelt időt szabatosan ki lehet számítani. Persze, bizonyos egyszerűsítő feltételezésekkel és jó határfeltételi adatokkal.

W. Thomson (a későbbi Lord Kelvin) 1863-ban közölt számítása a kezdeti izzó földtestet 3900 °C-nak vette, a hűlés számítása során pedig homogén és izotróp testben végbemenő vezetési hő szállítást (kondukción) tételezett fel. A földbolygó kora az az idő, ami ahhoz szükséges, hogy a Föld felszínén a mai, átlagosan 36 °C/km értékű hőmérsékleti gradiens kialakuljon. Ha a bemenő adatok minden megengedhető szélsőértékét figyelembe vesszük, akkor a Föld korára így kapott érték 24 és 400 millió év között változik, de legjobb becslése 96 millió évnél adódik.

Akármielyik érték is legyen a számítás eredménye, az a geológusok számára az nevésségesen kicsi, mert a rétegtani és tektonikai folyamatok ütemének becsült értéke alapján legalább 10-szeresen hosszabb időt vélték helyesnek. Darwin és az evolúciós elmélet hívei számára is a „szabatos” fizika értelmezhetetlen és kiábrándító eredményt hozott. Az akkor kialakult heves vita két, alapvetően eltérő tudományos gondolkodásmód között folyt és hamar viszályá változott. Lord Kelvin rangjának és a matematikai fizika felsőbbrendűségének hitében többször is durván megsértette Darwint és az evolúciós elmélet híveit.

A fizika és a földtan új eredményei és néhány nagyszerű ember helyes érvelése azonban egyhamar a tudománytörténet emléktárába söpörte Kelvin számítását. Nem azért, mert Kelvin rosszul számolt, hanem amitt, mert számolása során tett egyszerűsítő feltételezésekről derült ki, hogy hibásak. Ez igazából két nevezetes eseménnyel kapcsolatos: az egyik széles körben ismert, a másik pedig a tudománytörténet legújabb felismerése, amely új megvilágításba helyezi az egész történetet.

Közismert, hogy Becquerel az urán, Pierre és Marie Curie pedig a tórium esetében mutatták ki annak természetes sugárzását. A természetes radioaktivitás jelenségének felfedezéséért mindhárman 1903-ban Nobel-díjat kaptak. Rutherford jött rá arra, hogy a Föld anyagaiban jelenlévő radioaktív elemek sugárzása számottevő szerepet játszik a Föld energiaháztartásában. Ezt 1907-ben a Royal Society előadóülésén jelentette be, ahol megjelent a már nagyon idős Kelvin is. Rutherford elmondása szerint előadásában, mikor a kényes ponthoz ért, azt hangsúlyozta, hogy Kelvin kormeghatározása helyes volt, de az új földi energiaforrás felfedezése miatt érvényét veszítette. A valódi kor Kelvin értékénél jóval nagyobb kell, hogy legyen! Az anekdota szerint az öregúr ezt megnyugodva fogadta és békésen tovább szunyókált (Horváth G. XXX).

Az újabb tudománytörténeti kutatások mutattak rá egy másik és még izgalmasabb történetre (England és tsai, 2007). Volt Kelvinnek egy fiatal munkatársa, John Perry, aki pontosan tudta, hogy mestere csalhatatlan számításaiban. Ha az eredmény mégsem megfelelő, akkor

a hibát az egyszerűsítő feltételezések között kell keresni. Hamarosan rájött, arra hogy a Föld anyagainak hővezető-képességét nem lehet állandónak tekinteni, mert az a mélységgel valószínűleg jelentősen növekszik. Sőt, egy adott mélységtől (kb. 100–200 km) kezdve a kőzetek olyan folyadékszerű állapotba jutnak, hogy bennük a hő szállításának fő mechanizmusa nem a vezetés, hanem az annál sokkal hatékonyabb anyagáramlásos hőtranszport, más néven termikus konvekció!

A Föld köpenyében zajló konvekció olyan mennyiségű hőt tud a külső szilárd burokhöz szállítani, hogy a hatékony hűtőanyag miatt az csak nagyon lassan hűl. Azaz, mai viszonylagos melege (az átlagosan 36°C/km értékű felszíni gradiens) nem kis kora (96 millió év) miatt, hanem a mélységi „ősi hőmennyiség” hatékony felszállítása következtében alakul ki. Valóban, Perry (1895) konvekciót is figyelembe vevő számításai a Föld korára néhányszor 1000 millió évet adtak, ami nagyságrendileg egyezik a mai ismereteink szerinti 4560 millió évvel. Bár munkáját a már akkor is a legjobbnak számító Nature című folyóiratban publikálta, eredménye visszhangtalan maradt a fizikusok és földtudósok csatájában.

### Kontinensek és óceánok eredete a zsugorodó Földön

Amíg a XIX. század második felében a hűlő Föld volt az uralkodó elv, addig az óceánok és kontinensek eredetét a folyamatos hő vesztesé miatt állandóan zsugorodó bolygó keretein belül igyekezett magyarázni a korabeli földtudomány.

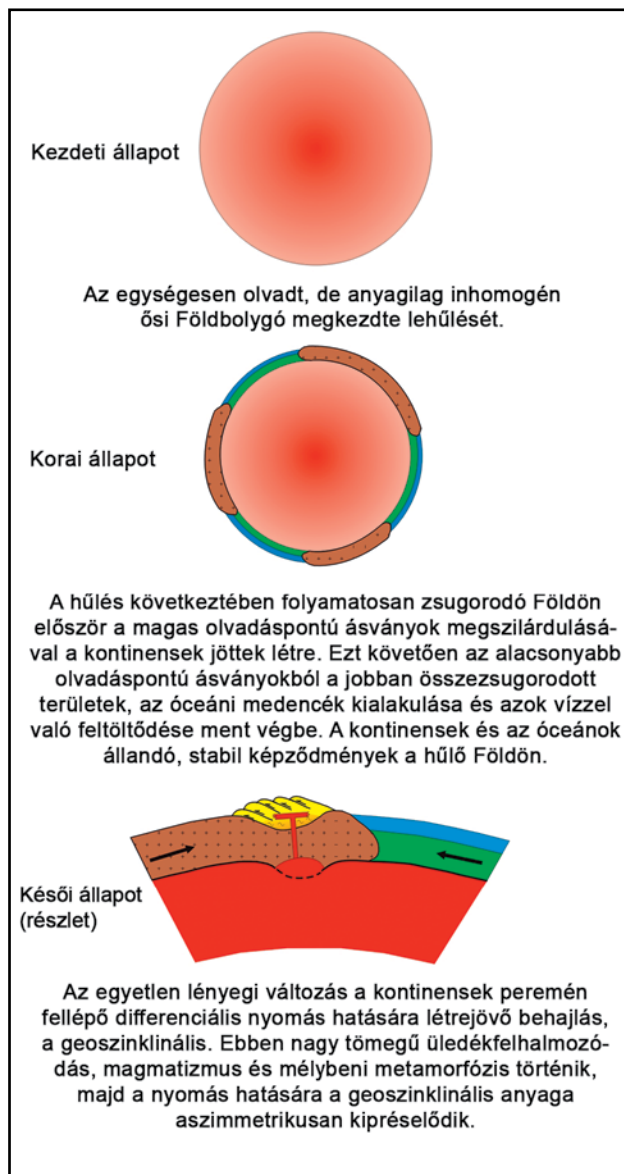
Alapvetően két vezető iskola létezett. A gazdasági virágzásnak induló Amerikai Egyesült Államok térképező geológusai és a megfigyeléseket koncepcióvá érlelő tudósok köre, kiknek legnagyobb szaktekintélye James Dana (1813–1895), a Yale Egyetem professzora volt. A másik iskola a boldog békeidőket élő Európában alakult ki és az Alpok geológiai felfedezésének az útján haladt előre. Vezéregyénisége, kétségtelenül a Bécsi Egyetem professzora Eduard Suess (1831–1914) volt.

#### Az amerikai iskola

James Dana szerint az ősi, olvadt földbolygó hűlése során a felszín azon részei szilárdultak meg először, ahol a magasabb olvadáspontú ásványokból álló kőzetek helyezkedtek el. Így alakultak ki elsőként az ősi kontinensek (1. ábra). Más területeken, ahol az alacsonyabb olvadáspontú ásványok voltak többségben, valamivel hosszabb hűlési időszak volt szükséges a megszilárduláshoz, ennél fogva nagyobb mértékű volt a zsugorodás is. Így alakultak ki az ősi óceáni medencék, amelyek mélyebbek és ásványos összetételüket tekintve különböznek a kontinensektől. A Föld külső szilárd rétegének kialakulásával egyidejűleg csapódtak ki vizek is, amelyek mennyisége nem változott a földtörténet során. Eleinte a kontinensek peremi részei is vízzel voltak borítva és a tengerek fokozatosan húzódtak vissza mai óceáni medencékbe. A kontinensek peremén jelentős mennyiségű tengeri üledékes kőzet tudott felhalmozódni (geoszinklinálisok), és a differenciális zsugorodás miatti torlódás eredményeképpen hegységekké gyűrődni (1. ábra).

Dana koncepcionális jelentőségű következtetése az volt, hogy mind a kontinensek, mind az óceánok a Föld megszilárdulása során létrejött ősi nagyszerkezeti egységek, amelyek jellegüket, méretüket és helyzetüket érdemben nem változtatták a földtörténet során. Az óceánok mindig óceánok, a kontinensek mindig ugyanolyan méretű és alakú kontinensek voltak. Ez Dana híres *állandóság (permanencia) elve*, amely egy kvázi-stabil, megismerhető múltú és előre jelezhető jövőjű Föld képét vázolta fel. A kvázi-stabilitás az jelentette számára, hogy a kontinensek peremén fellépő különbségi feszültség hatására egy jelentős mértékű kéregbehajlás alakulhat ki, amelyik nagy mennyiségű üledékes és magmás kőzetet tud befogadni (1. ábra). Ezt nevezte geoszinklinálisnak, amelynek további összenyomása eredményezte a hegységeket.

Dana geoszinklinális-elmélete, valamint a kontinensek és óceánok állandóságának elve a XIX. század végétől nemcsak általánosan elfogadottá vált Amerikában, hanem nemzeti tudományos büszkeség tár-



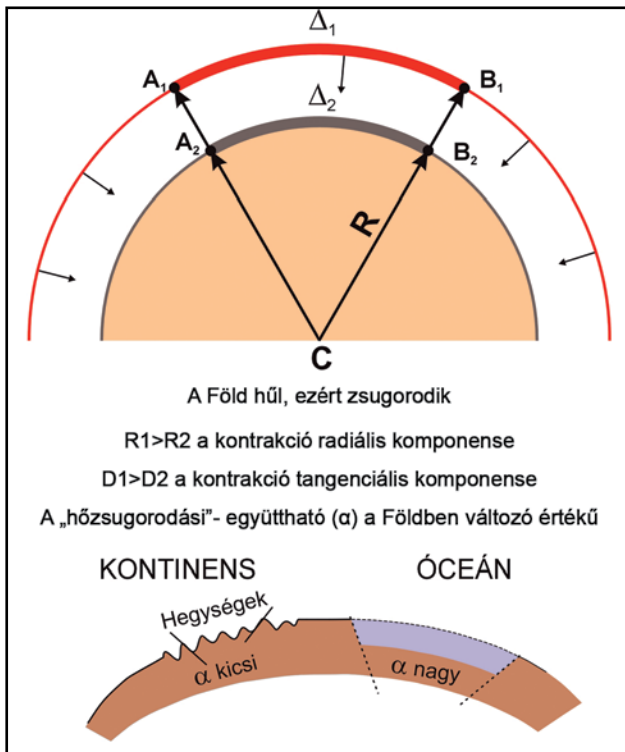
1. ábra: Az ősi kontinensek kialakulásának folyamata

gyát is képezte. Csak így érthető meg az elutasító magatartás, amelyben az amerikai geológus társadalom részesített legalább fél évszázadon keresztül minden kívülről (alapvetően Európából) jövő ezzel elentéses megfigyelést és elméletet (Oreskes, 1999).

#### Az európai iskola

Az első globális tektonikai elmélet megalkotása Európában egy zseniális tudós, az osztrák *Eduard Suess* személyéhez kapcsolódik. Kiemelkedő képességeinek legkésebb bizonyítéka, hogy képes volt megtanulni a teljes Föld geológiáját és azt egy „A Föld arculata” című, háromkötetes könyvsorozatban közreadni (1885-1909).

Személyének különleges fontossága van a magyar geológia szempontjából is. Ennek illusztrálására néhány sort idézek Lóczy Lajos nekrológiájából: „Az 1914. év áprilisának 29-ik napján, a Rozália-hegység alján fekvő sopronvármegyei Márcfalva csendes temetőjében helyezték örök pihenőre korunk egyik legnagyobb természettudósát és legnemesebb férjfiát, Suess Edét, aki magyar földben akart nyugodni. ... A magyarságnak nem volt és soha nem lesz osztrák szomszédai között Suess Edénél jobb barátja. ...Mennyi magasröptű gondolat és milyen sok tanulmány támadt itt magyar földön, a lángoló lelkű költő-geológus agyában.”



2. ábra: A Föld-zsugorodás elméleti vázlata

Suess alaptétele is az volt, hogy a Föld ősidők óta hűl, s ennek következtében fokozatosan zsugorodik (2. ábra). A zsugorodás a Föld térfogatának (azaz sugarának) csökkenése mellett, együtt jár a Föld felszínének fokozatos kiszélesedéssel is. Ennek megfelelően megkülönböztette a zsugorodás radiális és tangenciális komponensét. Suess elképzelése abban különbözik lényegesen Danaétól, hogy tagadta a permanencia elvét.

Szerinte a hűlés során először óriási méretű, a Föld felszínét teljesen bedefő, *egységes őskontinens* jött létre. Az ősi óceánok aljzatát az egykoron felszínen lévő, de később beszakadt kontinentális blokkok alkották. Elképzelése szerint az így kialakult korai állapot tovább változott, mert a földtörténet során a beszakadt kontinensek kiemelkedésével új kontinensek képződtek, ugyanakkor új óceánok is jöttek létre kontinentális területek későbbi besüllyedésével.

Suess a *teljes felcserélhetőség* modelljével magyarázta azokat a meglepő azonosságokat, amelyek az élővilág fejlődésében a paleontológusok kimutatták. Azaz, szerinte a mai elkülönült kontinensek között elsüllyedt régi kontinensek léteznek, amelyek biztosították az egykori összetartozást. Nevezetesen, a mai északi kontinensek elsüllyedt területeikkel együtt alkották Angara-földet, míg a déli kontinensek és elsüllyedt darabjai képezték Gondwanát Angara-föld és Gondwana között a paleozoikum végén beszakadással jött létre a Tethys-óceán.

Hegységképződés szempontjából a tangenciális zsugorodási komponens, vagyis a Föld felszínének állandó csökkenése alapvető jelentőségű, mert ez szolgáltatja a hegységképződéshez szükséges horizontális térrövidülést és kompressziót. Hasonlata szerint a hegláncok a Föld felszínén olyanok, mint a kiszáradó alma héjának a ráncai. Elképzelése alapján, logikus módon tagadta a geoszinklinális elméletet, mert az üledékgyűjtő medencéket az egykori óceánokkal azonosította. A Tethys-óceán kerge és üledékei a horizontális kompresszió hatásá-

ra felgyűrődtek és rátólódtak a merevebb kontinentális előtérre, ami egyúttal betolódott a kontinensek alá. Ez a szubdukció jelenségének első zseniális megsejtése volt.

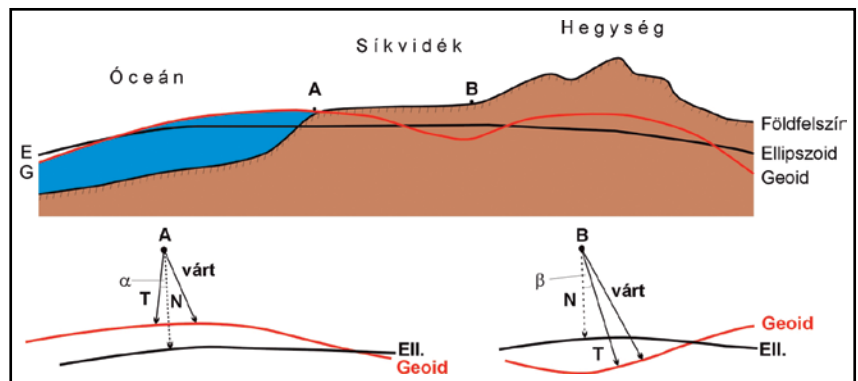
Suess nagy ívű koncepciójának fő nehézsége az volt, hogy nem lehetett összeegyeztetni az izosztázia elvével, ami szigorúan szabályozza a függőleges kéregmozgások mechanizmusát, és nem teszi lehetővé a felcserélhetőséget, azaz a kontinensek óceánválasát és az óceánokból kontinensek képződését.

### Az izosztázia elve

Az izosztázia elvének megszületése szorosan kapcsolódik a földmérések történetéhez, és így kezdetei az ókori hellén civilizációig nyúlnak vissza. Alexandriai Eratoszthenész (K.e. 276–194) annak biztos tudatában, hogy a Föld – mint minden ideális test – gömb alakú, egyszerű geometriai elvet kitalálva és az alexandriai könyvtárban fellelt adatokat felhasználva kiszámította a Föld sugarát. A következő érdemi lépésre Newtonig (1643–1727) kellett várni, mert tömegvonzási törvényét a forgó testekre ható centrifugális erővel kombinálva arra lehetett következtetni, hogy a Föld alakjának jobb közelítése a pólusainál belapult forgási ellipszoid.

Gauss (1777–1855) definiálta először a Föld valódi alakját, a *geoidot*, amelyet a nehézségi erőterének az óceánok nyugalmi szintjével egybeeső ekvipotenciális felülete alkot. Ez a földi sűrűség inhomogenitásai és dinamikus hatások miatt egy bonyolult térbeli alakzat, amely csak kismértékben tér el a forgási ellipszoidtól.

A geoid alakjának meghatározására használt tradicionális földmérési eljárásnak *fokmérés* a neve. Ennek során egy meridián kör men-

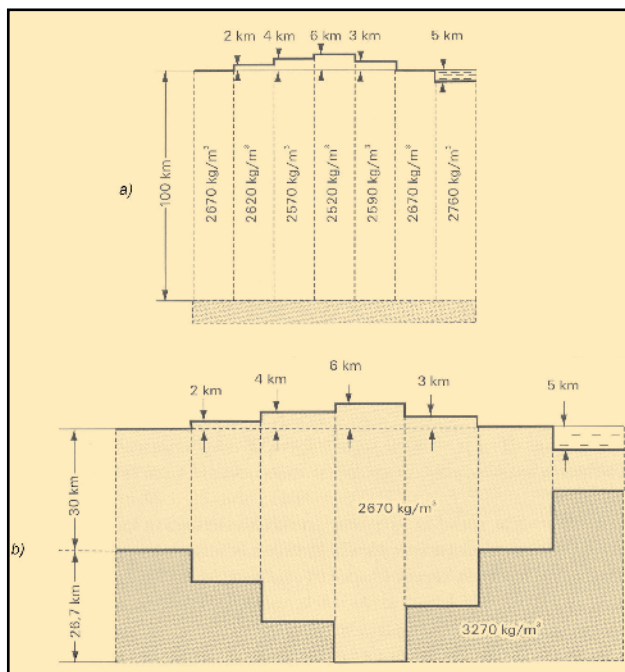


3. ábra: A függővonal-elhajlás vázlata

tén méri fix pontok egymástól való távolságát és a fix pontokban a helyi függővonal szögét a Föld forgástengelyéhez viszonyítva. A függővonal a helyi nehézségi erő irányát mutatja, ami pedig merőleges a helyi geoidra. A Föld egy adott helyén mért és abban a pontban az ellipszoidra számított függővonal irányok különbségét függővonal-elhajlásnak nevezik.

A Francia Tudományos Akadémia megbízásából Pierre Bouguer (1698–1758) felmérést végzett Peruban (1735–1745). Meglepetésszerűen talalta, hogy az Andok lábainál végzett méréseiből levezetett függővonal-elhajlás értéke sokkal kisebb annál, mint amit ez az óriás tömegű hegy indokolna. Bölcsen nem a newtoni tömegvonzási törvény helyességében kezdett el kételkedni, hanem egy, a hegységhez kapcsolódó és annak vonzó hatását jelentősen kompenzáló tömeghiányt tetelezett fel. Majdnem egy évszázaddal később az indiai brit gyarmaton szolgálatot teljesítő főgeodéta, George Everest által irányított mérések megerősítették a Bouguer által felfedezett, talányosan kicsi függővonal-elhajlást a Himalája előterében is.

Everest kérésére John Pratt matematikus kezdett el foglalkozni a problémával és rövidesen ugyanarra a következtetésre jutott, mint ko-



4. ábra: Pratt, illetve Airy modellje

rábban Bouguer. Nevezetesen a felszínen látható hegység tömegvonzó hatását valamilyen, a hegységhez kapcsolódó felszínalatti tömeghiány hatásosan csökkenti. Hamarosan rájött arra, hogy a függővonal-elhajlás mérések ugyanezt a talányos jelenséget mutatják, csak fordított előjellel, az óceánok partvonala közelében is (3. ábra). Nevezetesen, a függővonal általában az óceánok felé hajlik el, jöllehet a kis sűrűségű vízzel kitöltött óceáni medence nyilván jelentős tömeghiányt jelent. Az óceánok alatt tehát tömegtöbblet, azaz nagyobb sűrűségű anyag kell, hogy elhelyezkedjen.

Pratt a méréseket és azok értelmezését elküldte publikálásra Angliába. A majd félszáz oldalas cikk 1855-ben meg is jelent, de közvetlen követte egy másik rövid cikk, amely egy alternatív modellt javasolt. Ezt a modellt vezető szaktekintély, Anglia királyi csillagásza, George B. Airy találta ki Pratt cikkének lektorálása során. A két modellt a 4a-b. ábra mutatja. Pratt modelljében a kiemelkedő blokkok (hegységek) kis sűrűségűek, a kontinentális platók közepes sűrűségűek, az óceáni medencék pedig a legnagyobb sűrűségűek. Az úszás törvénye úgy teljesül, hogy minden egyes blokk talpnyomása azonos. Ezzel szemben Airy modellje azonos sűrűségű kérget tételez fel a Föld teljes felületén, de szerinte a kéregblokkok vastagsága változó. A kéregblokkok az archimédieszi úszási törvénynek megfelelő egyensúlyi helyzetet foglalják el a folyadékyszerű köpenyanyagon.

Mindezek fényében világossá vált, hogy Skandinávia jégkorszak utáni 2-10 mm/év sebességű emelkedése nem más, mint az izosztikus egyensúly helyreállításának folyamata a jégtakaró terhelésének megszűnte után. Lóczy himalájai megfigyelései (1877–90) alapján hívta fel a figyelmet az izosztázia felszínformáló hatására, midőn a magas hegyek közé élesen bevágódó folyókat a hegység gyors izosztikus emelkedésével magyarázta.

Pratt és Airy koncepciójának Dutton adta az *izosztázia* (azonos nyomás) elnevezést, és az ő munkássága révén lett az elv általánosan elfogadott. Érthető okok miatt Amerikában is, hiszen az izosztikus kompenzáció mindkét modellje könnyen összeegyeztethető Dana permanencia elvével, de ellentétes Suess elképzelésével az óceánosodó kontinensekről és a kontinensé váló óceánokról.

Látjuk, hogy a XX. század elején a nagy felfedezések és a feloldhatatlan ellentmondásban lévő elméletek jellemezték a globális geodinamikát. Érettnek látszott az idő egy új globális koncepció megszületésére. És akkor jött Wegener...