

EÖTVÖS LORÁND IDŐSZERŰSÉGE – 2. rész

Rejtőzködő hegyvonulatok gravimetriás feltárása – Eötvös álma megvalósul

Patkós András
ELTE Fizikai Intézet

Az eötvösi vízió

„Itt lábaink alatt terjed el, hegyek koszorújától övezve, az Alföld rónasága. A nehézség azt lesimitván, kedve szerint formálta felületét. Vajon milyen alakot adott neki? Micsoda hegyeket temetett el és mélységeket töltött ki lazább anyaggal, amíg létrejött ez az aranykalászokat termő, a magyar nemzetet éltető róna? Amíg járok rajta, amíg a kenyérét eszem, erre szeretnék még megfelelni...” [20]

Gravitációs mérések sorozatával *Eötvös Loránd* és munkatársai 1901-ben a Balaton jegén 30 állomáson állapították meg a földfelszín lokális görbületét. A mérések összeillesztésével egy Kenesétől majdnem Tihanyig húzódó vízalatti hegységet fedeztek fel. „Azzal a kíváncsisággal, mellyel az utazó, ismeretlen vidékre jutván, annak hegyeit és völgyeit kutatja, jártam én is a Balatonon. Az én ismeretlen vidékem ott feküdt mélyen a jég sima tükre alatt; nem láttam, s nem is fogom látni soha, csak eszközöm érezte meg...” [20]

A költői hevületű beszámolóban megfogalmazott tudományos program évszázad múltán immár a globális földtörténet kutatásának gyakorlatias eszköze. A gravitáció helyi változását jellemző méréseket ma nem néhány kilométerenként fáradságos munkával újraterelített mérőházikóban, a torziós szál nyugalmi helyzetének kialakulására sok órát várva ismétlik. Repülőgépen vagy éppen műholdon elhelyezett *gravimetrikus* mérőeszközökkel szinte folyamatos a repülés útján változó mérőpontok során a gravitációs vonzás nagyságának és irányának adatfelvétele. Az adatokat ábrázoló *gravitációsanomália-térképeken* sok ezer vagy akár millió négyzetkilométeres tenger- vagy jégfelület alatt húzódó láthatatlan domborzati objektumok képe tűnik fel. A párhuzamos *földmágnességi mérésekkel* (amelyeket már Eötvös is elvégzett) párosítva kontinensek földtörténeti korok időskáláján bekövetkezett vándorlását is fel tudják deríteni.

A modern mozgó laboratóriumokban nyert mérésadatok értékelésének kötelező mozzanata a gravimé-



6. ábra. Wegener elképzelése az egyetlen, egységes őskontinensről.

terek méréseinek *Eötvös-korrektója*. A műveletet azért neveztek el a geofizikusok Eötvös Lorándról, mert ő hívta fel figyelmüket arra, hogy a forgó Föld felületén mozgó eszközzel végzett gravitációs (szabadadéses) mérések eredményeinek értelmezésében a tehetetlenségi erők hatását is figyelembe kell venni. Ezért a geofizikában a közismert centrifugális és a Coriolis-hatás együttesének neve: Eötvös-hatás [21]. Alig több, mint 100 éve még tudós geofizikusokat kellett figyelmeztetni létezésére. A jelenség mindmáig bekerül a felsőbb szintű földmérési szakkönyvekbe, bár speciális esetre középiskolások is könnyen megértik. Az „Eötvös-korrektó” elnevezést az újabb közlemények majd mindegyike *R. B. Harlan* 1968-as cikkére [22] hivatkozva használja.

Ismertetésünk célja az Eötvös-hatás alkalmazásának bemutatása a 21. század földtörténeti kutatásaiban.

Az őskontinens feltöredezéseinek nyomában

Az 1920–30-as években *Alfred Wegener* vonta a tudományos figyelem fókuszába a földtörténet – zömében az élet megjelenése előtti (a proterozoikum) korszakában létezett – szuperkontinenseinek kialakulását, majd feltöredezésük kérdését. Javaslatát, amely főleg a mai kontinensek partvonalainak geometriai összeilleszthetőségén alapult (6. ábra), egyre alaposabb geológiai tanulmányok tették növekvő mértékben el-



Patkós András (1947) akadémikus az ELTE emeritus egyetemi tanára. Elméleti fizikus, aki a kvantumtérelméletek megoldási módszereit fejleszti, az erős és az elektrogényge anyag fázisátalakulásait, azok kozmológiai szerepét kutatja. Számos tankönyv (társ)-szerzője. Rendszeresen ír tudományos-népszerűsítő cikkeket is.

fogadottakká. A mai globális éghajlati modellek a földtörténet korai szakaszaira vonatkozó szimulációkba beépítik a szuperkontinensek és az ósóceáni áramlások hatásait.

A legalaposabban tanulmányozható dinamikájúnak a nagyjából 800–500 millió évvel ezelőtti az egységes Pangeától elvált, a déli féltekén kialakult Gondwana őskontinentst tartják. Ez 120–140 millió évvel ezelőtti az utolsó nagy lemezdinamikai (tektonikai) folyamatban a mai Dél-Amerika, Afrika, az Antarktisz és Ausztrália kontinenseire töredezett szét. Belőle szakadt le India is, amely azután az északi Laurasia őskontinenssel ütközve a Himalája vonulatát gyűrte fel.

Afrika és az Észak-kelet Antarktisz hegységeit alkotó, mára sok ezer kilométer távolságra került kőzetek mineralógiai vizsgálatával, az azonos korúakba befagyott mágnesség nagyságának és irányának laboratóriumi elemzésével meggyőzően igazolható az egykori kontinentális összetartozás. Azonban Afrika és az Antarktisz közötti óceán-borította óriási területen a tengerfenéknek meg a Kelet-Antarktisz 2 km vastagságú jéggréggel borított talapzatának geológiai vizsgálata – amellyel közvetlenül felderíthető lenne a szétválás során leszakadt kontinentális táblarészek alkotta „híd” – irreálisan drága próbálkozás. Az eötvösi álmodat műholdon és repülőgépen elhelyezett modern eszközökkel megvalósító gravitációs és mágneses mérésekkel kirajzolt és megfejtett anyagi összetételű domborzat látszik a leginkább járható útnak.

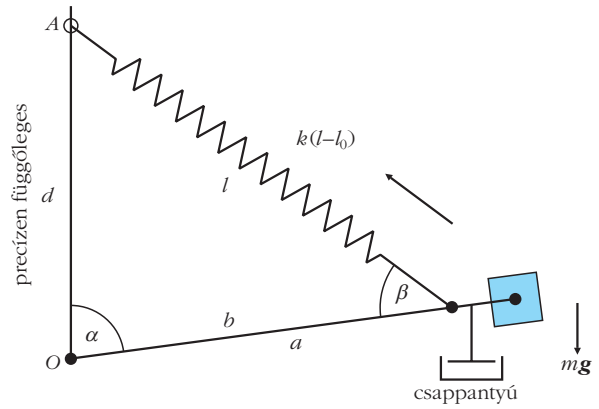
A repülőgépes gravimetria elve és az Eötvös-korrekción

Hogyan méri a \mathbf{g} nehézségi gyorsulást a mozgó repülőgépen? Newton II. törvénye alapján, kihasználva a súlyos és a tehetetlen tömeg arányosságát, írható a következő összefüggés:

$$\frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2} = \mathbf{a} + \mathbf{g},$$

ahol $d^2\mathbf{x}/dt^2$ (például az útvonal GPS-jelekkel kirajzolt nagy pontosságú hely-idő összefüggéséből meghatározhatóan) a teljes (kinematikai) gyorsulás. A graviméter (gyorsulásmérő) viszont kizárólag \mathbf{a} -t, a nem gravitációs erőkből származó gyorsulást érzékeli. Ez az általános relativitáselmélet alapelve, az ekvivalenciaelv következménye, amely szerint a nehézségi erőterben szabadon eső testtel együtt eső rendszerben a gyorsulásmérő nullát mutat. A fenti egyenlet szerint tehát két önállóan mérhető mennyiség különbségeként határozható meg \mathbf{g} , a nehézségi gyorsulás lokális értéke. A gyorsulás mérésének fizikai elve a legelterjedtebben használt LaCoste–Romberg-graviméter példáján mutatható be (7. ábra).

Az eszköz egy függőleges tengelyen rögzített végű k erőállandójú rúgóból áll, amelynek másik vége e tengelyhez csuklósan csatlakozó rúdon csúszkálhat. E rúd végén, a csuklós csatlakozástól a távolságra egy



7. ábra. A LaCoste–Romberg-graviméter működésének fizikai elve.

m tömeg található. A csúszka egyensúlyi helyzetéhez tartozó távolságot O -tól jelöljük b -vel. Földön nyugvó (egyenletesen haladó) rendszerben a rúd forgási egyensúlyának egyszerű feltétele (a szinusz-tétel alkalmazásával)

$$k b d = m g a.$$

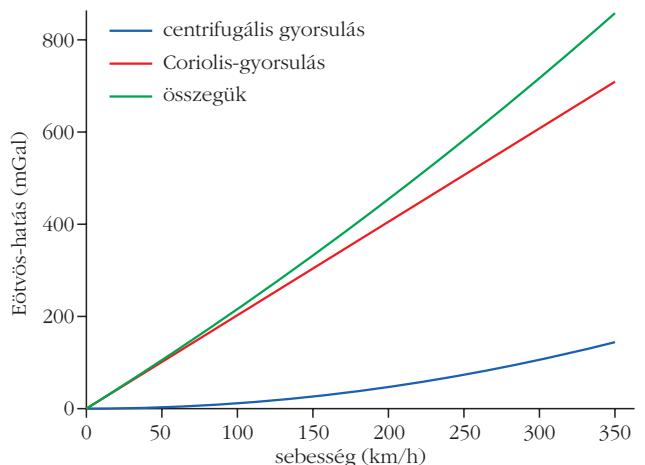
Amennyiben függőlegesen gyorsuló rendszerben (például egy rakétában) vagyunk, akkor jobb oldalon – az ekvivalenciaelvnek megfelelően g helyén – a nem gravitációs gyorsulás jelenik meg (amelynek pozitív értékét függőlegesen lefelé irányítják):

$$k b d = m a_{\text{függőleges}} a.$$

Az ábrából azonnal látható, hogy például a repülőgép irányváltozásából származó, esetleges vízszintes irányú gyorsulásnak is van forgatónyomatéka, amelynek egyensúlyra gyakorolt hatását a graviméter alkalmas konstrukciójával minimalizálni lehet. További korrekciókra is szükség van, például ha a repülőgép a graviméter tengelye eltér a függőlegestől. Általános jellemzésül elmondható, hogy a berendezés nyugalmi rendszeréből több lépésben transzformálják az adatokat egy közös inerciarendszerbe.

A Föld idealizált gömbi vagy ellipszoid alakjához adott földrajzi szélességen normalizált nehézségi

8. ábra. Az Eötvös-hatás sebességfüggése (a 45. szélességi körön, 45°-ban mozogva/repülve).



gyorsulási értéktől – tapasztalat szerint – mérhető 50–100 mGal¹ nagyságrendű lokális eltéréseket hívják gravitációs anomáliának. Ezt a mennyiséget két nagyon nagy (körülbelül 10 000 mGal nagyságú) szám egymásból történő kivonásával határozzák meg. Az így meghatározott effektív gravitációs gyorsulás lényeges része a $\delta g_{Eötvös}$ Eötvös-korrektció, amely a mérőberendezés sebességétől függően akár az 1000 mGal értéket is elérheti (8. ábra). A nehézségi erőter okozta gyorsulást e korrekció levonása után kapják meg. R sugarú gömbalakhoz viszonyítva, a h magasságban repülő graviméterre a Coriolis- és a centrifugális hatásból összeadó korrekciót a tömegvonzási gyorsuláshoz jól ismert képlet adja:

$$\delta g_{Eötvös} \approx 2 \omega_E v_E \cos \varphi + \frac{v^2}{R+h}.$$

Ebben ω_E a Föld forgási szögsebessége, v_E a viszonyítási szint felett h magasságban mozgó berendezés sebességének a szélességi kört érintő komponense, v a Föld forgásából származó kerületi sebesség adott magasságban, φ pedig a Föld középpontjából a berendezés helyzetéhez húzott vektor és az egyenlítő síkjával bezárt szög (a földrajzi szélesség). A gömb helyett inkább a geoid átlagos adataival definiált forgási ellipszoidot szokás referenciafelületként használni. Az Eötvös-hatás korrekciójának képletét erre R. B. Harlan adta meg először [22].

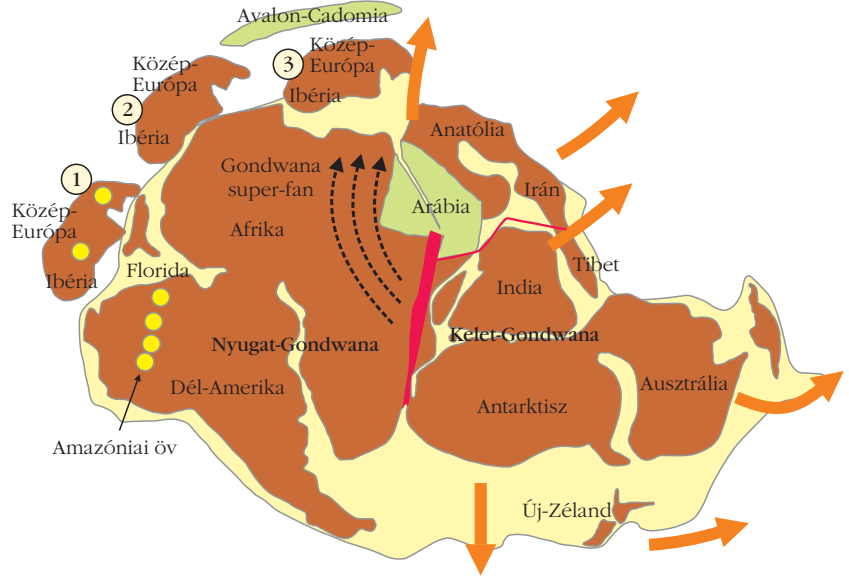
A repülőgép használatával készülő gravimetriai térképhez hasonló geodéziai műholdakkal is készítenek. Az elmúlt években 3 ilyen missziót hajtottak végre (CHAMP, GRACE és GOCE), ám a repülőgépes gravimetria pontossága a kisebb repülési sebesség és a mérési útvonalak sűrű hálójával lefedhető nagy területek révén nagyobb, mint a műholdaké. Ezért azok adatait repülőgépes mérésekkel hitelesítik, pontosítják.

Térjünk vissza végül a tenger- és jégborította domborzat repülőgépes gravimetriával végzett térképezésével feltárható földtörténeti múlthoz.

A Kelet-Afrika – Antarktisz hegységképződés vizsgálata repülőgépes gravimetriával

A Gondwana őskontinens létrejöttének időszakában, körülbelül 500 millió éve, Nyugat-Gondwana és Kelet-Gondwana kontinentális lemezei ütköztek és

¹ A gyorsulás gravimetriában használt egysége a gal (jelölése: Gal), *Galileo Galilei* nevét örökíti meg. Nagysága: 0,01 m/s². Egy mGal tehát 10⁻⁵ m/s².



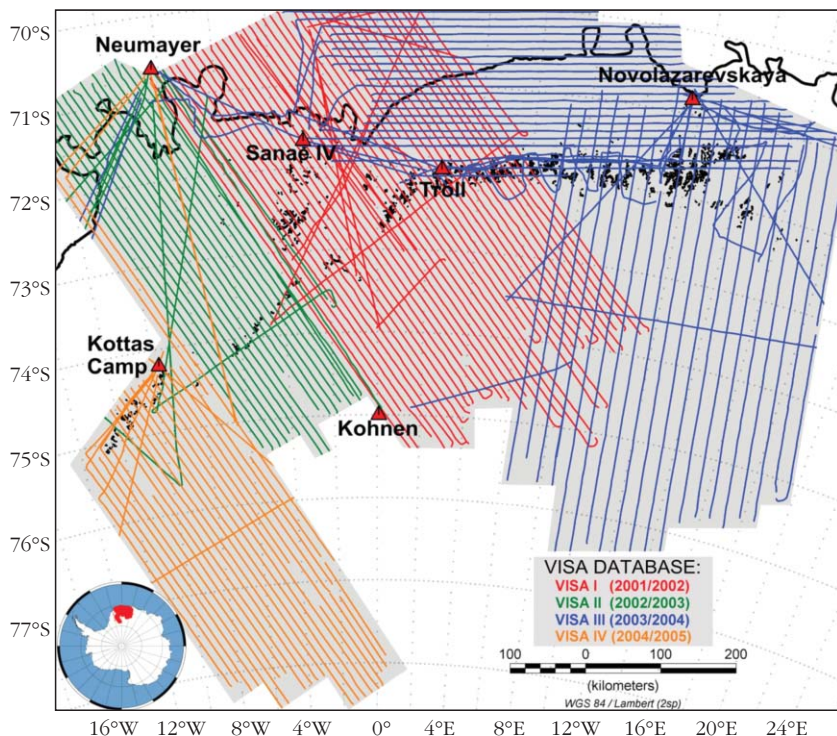
9. ábra. Az ütköző Kelet- és Nyugat-Gondwana rekonstruált kontinensszerkezete. Balra fent a Gondwanát kiegészítő kontinentális tábla 2013-ban javasolt három alternatív helyzete.

ezzel indult el a hegységképződés folyamata Kelet-Afrikában, amelynek eredményei, a Kilimandzsáróval az élen, ma is láthatók. Ez a terület akkor Nyugat-Gondwana határvidéke volt. Kelet-Gondwana érintkező területe a mai Kelet-Antarktisz volt (9. ábra). Közelebről, az Észak-Mozambikkal átellenes terület a földtörténeti rekonstrukció szerint az Antarktisz észak-keleti szélén található Maud Királyné Földje volt. Kapcsolatukra pozitív érvet szolgáltat a két terület hegyeit alkotó kőzetek összehasonlítása.

Az ütközésből létrejött, Arábiától (Núbiai sivatag) Kelet-Afrikán át – feltevés szerint – Maud Királyné Földjéig húzódó 8000 km hosszú hegylánc lenne Földünk egyik leghosszabbika, ha sikerül bizonyítani keletkezési egységüket.

Az Antarktiszon korlátozza a geológiai mintavételt, hogy a jégtakaró alatti talapzat közvetlenül nem tanulmányozható, a hegységek alkotó kőzetei csak az úgynevezett *nunatakok* (inuit szó: jéggel körülvett hegyet jelent) formájában, néhány helyen bújnak ki a jég alól. Közvetlen geológiai jellemzésre a képződmények teljes hosszában nincs mód.

2001 és 2005 között a bremerhaveni A. Wegener Tengerkutató Intézet repülőgépes laboratóriuma a terület közel felét jelentő 1,2 millió km² nagyságú tartományon pásztázott végig és elkészítette annak gravitációs- és mágneses anomália-térképét, továbbá a talapzatról visszaverődő radarimpulzusokkal meghatározta a tengervíz és jégtakaró alatti szilárd földkéreg mélységi topográfiáját. A felmérés során négy egymást követő nyári időszakban egymástól körülbelül 10 km távolságra lévő párhuzamos repülési utakon végeztek gravimetriás méréseket a nyugati hosszúság 10°-ától a keleti hosszúság 20°-áig, illetve a déli szélesség 70°-ától 78,5°-áig. Választott témánknak megfelelően a gravitációs anomália (azaz az ellipszoid alakú referenciafelületen mérhető/számítható értéktől való eltérés) meghatározását és eredményét mutatjuk



10. ábra. A gravimetriás mérések 4 kampányának repülési útvonalai. A vázlaton jól látszanak a nunatakok és az Antarktisz partvonalát.

be röviden. A repülési útvonalakkal lefedett földrajzi térséget mutatja a 10. ábra.

A mérések normalizálását a gravitációs gyorsulás abszolút skálán megmért értéke segítségével végzik el. Az Antarktison a jégmozgás miatt a mérési tartományba eső egy vagy több földi nyugvó állomáson meghatározott g érték 3-5 mGal ingadozást mutat egy 8-10 napos mérési kampány során. Ezért saját eszközüket a legközelebbi afrikai állomáson (Fokváros, Dél-Afrikai Köztársaság) mérhető adathoz normálták. A mérések kiértékelése után adódó gravitációs, mágneses és topográfiai térképeket S. Riedel PhD-dolgozata [24] közli.

A felszínre jutó hegyek (nunatakok) hagyományos térképét mutatja a 11. ábra.

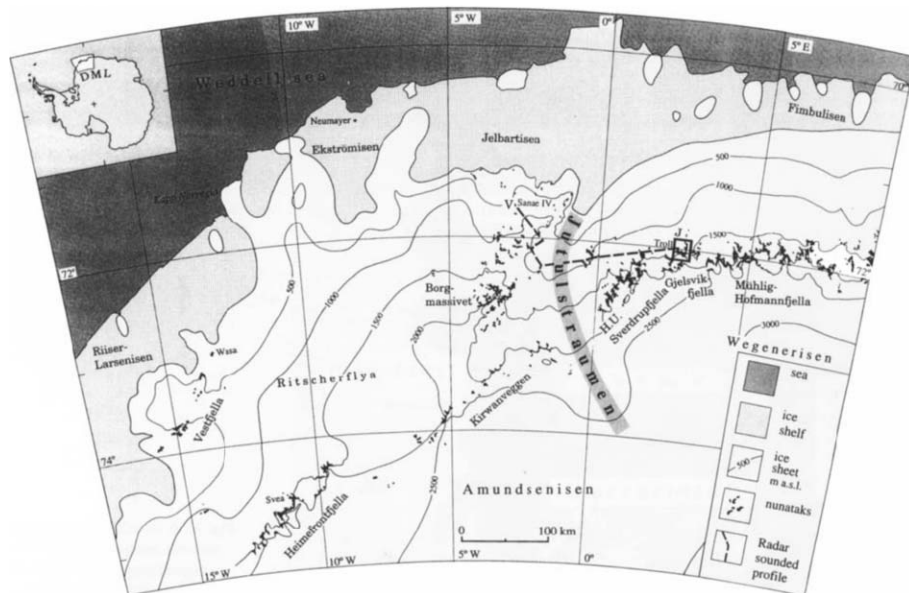
A levegőbeli gravimetriás mérések alapján az összes korrekciós tényező (így az Eötvös-hatás) figyelembevételével a 12. ábrán látható térkép adódik a Jutulstraumen elnevezésű árok környékére. Jól látszik, mennyivel részletgazdagabb és a domborzati viszonyokat részletesebben tükröző ez a térkép, mint a 11. ábra megfelelő területe, amelyen a felszíni hegykibúvások kiterjedés nélküli pontthalmazt alkotnak. Az alattuk, illetve környe-

zetükben található kőzetréteg elrendezésére az első pozitív információt a gravimetriás térképek nyújtják.

A 12. ábrán számozással megjelölt területekre a következő kvalitatív megállapításokat tette S. Riedel [24]. A partvonal előtt az óceánban mért 100 mGal körüli többletet az óceánfenék talpzatát alkotó nagyjából 10 km vastagságú kéreg hatása adja, amelyhez mélybe szakadt bazaltablák gravitációja járul hozzá (1). Az óceán-kontinens találkozásánál elvékonyodó kéreg okozza a negatív anomália-értékeket (2, 3), ami a Jutulstraumen árok mentén is folytatódik (4). A hegylánc teljes kiterjedésében – ugyan erősen töredezett szerkezetben – nagy pozitív anomália-értékekkel ábrázolódik. Mögötte a negatív értékek a jégtakaróval elfedett árkok jelenlétére utalnak (5, 6).

Az Eötvös-hatással korrigált adatokból létrehozott adatbázis a geológiai elméleti rekonstrukció kiindulópontja. A kőzetek anyagára, a földtörténet során bekövetkezett mechanikai, termikus és átkristályosodási folyamatok hatására vonatkozó modellt a kelet-afrikai kőzetminták tapasztalatára építik. A teljes hegységvonalat gravitációs (és mágnesési) térképének sikeres reprodukálása lehetőséget ad e modellvariánsok igazolására vagy cáfolatára. Az 550–500 millió évvel ezelőtti kelet-afrikai hegységképződés dinamikai modelljének fokozatos finomítása, pontosítása várható a napjainkban is egyre intenzívebben továbbfolytatott kutatásoktól.

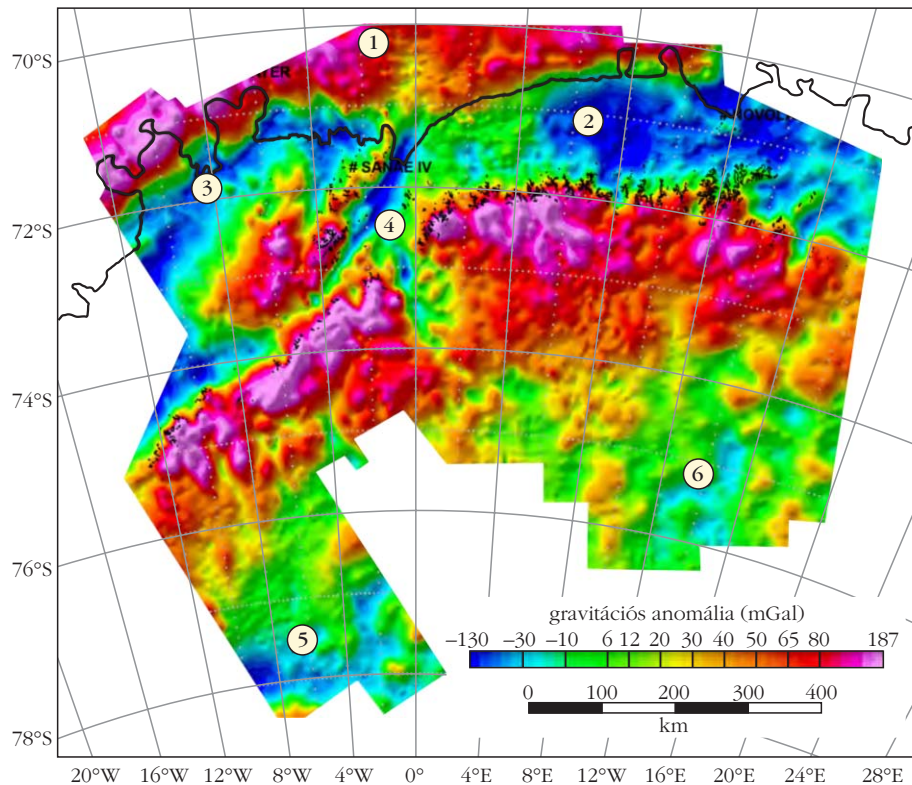
11. ábra. Nunatak-térkép a Dronning Maud Land tartományban: a bal alsó sarokból majdnem átlisan induló pöttyoszorlat meghatározza a hegységvonalat ívét, de valós kiterjedéséről semmit sem mond. A hegyláncot a Jutulstraumen-árok szakítja meg.



Eötvös Loránd valószínűleg elégedetten nyugtázná, hogy az elmúlt száz évben a Föld gravitációs terének mérésében bekövetkezett folyamatos fejlesztés révén „módunkban van biztosabb alapokra fektetni a földkéreg architektúrájának tanát, némi bepillantást nyerve olyan mélységekbe, melyekhez szemünk egyáltalán nem hatolhat, és fúróink el nem érnek.” [20]

Irodalom

20. Eötvös Loránd elnöki beszéde az MTA 1901. évi közülésén. Megjelent: *Eötvös Loránd, a tudós és művelődés politikus írásaiból*. Sajtó alá rendezte Környei Elek, Gondolat Kiadó (1964) 151–160.
21. Br. Eötvös Loránd: Kísérleti kimutatása annak a nehézségi változásnak, amelyet valamennyi mozgó test elszenved. *Mathematikai és Természettudományi Értesítő* (1920) 1–28.
22. R. B. Harlan: Eotvos corrections for airborne gravimetry. *Journal of Geophysical Research* 73 (1968) 4675–4679.
23. S. Riedel, W. Jokat, D. Steinhage: Mapping tectonic provinces with airborne gravity and radar data in Dronning Maud Land, East Antarctica. *Geophys. J. Int.* 189 (2012) 414–427.
24. S. Riedel: Airborne-based Geophysical Investigation in Dronning Maud Land, Antarctica. PhD-értekezés, Bremen, 2008 (letölthető: <http://epic.awi.de/20643>)



12. ábra. A Jutulstraumen-árok környékének gravitációsanomália-térképe.