

A „Földforgásvektor kölcsönhatása geodinamikai folyamatokkal” (K60394) OTKA téma keretében végzett kutatásaink folytatását jelentik a T038123 OTKA „A Föld pólusmozgásainak komplex vizsgálata” projekt keretében 2002-2005 években végzett munkának. Azonban míg a korábbi időszak vizsgálatai elsősorban merev és homogén égitest modellekre (Föld és Hold) épültek földforgással kapcsolatos kutatásaink, addig 2006 és 2009 közötti modelljeinkben, építve elsősorban a 2002-2005 időszak elméleti eredményeire, inhomogén elasztikus és anelasztikus belső szerkezeteket tételeztünk fel. Mindez megkívánta az Euler féle egyenlet helyett az Euler-Liouville egyenlet felhasználását (Varga P., Engels J., Grafarend E.: Temporal variations of the polar moment of inertia and the second degree geopotential. *Journal of Geodesy*, 2004, 78, 187-191) és a különböző frekvenciájú geodinamikai folyamatok esetében eltérő értékű Q minőségi tényezők alkalmazását (Varga, P.: Earth tidal phase lag and the tidal development of the Earth-Moon system. *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Earth Tides. Obs. Roy. Belgique, Série Geophysique*, 297-305, Bruxelles, 1998 ; Varga P.: Geophysical geodesy beyond 2000. In: „The Challenge of Geodesy in the Third Millennium”(Eds.: Grafarend, Krumm, Schwartze) , Springer Verlag, 2002, 463-470). Vizsgálataink fontos eszköze volt az égitestek alakja és belső szerkezete között kapcsolatot teremtő MacCullagh egyenlet illetve annak általánosított formája (Engels J., Grafarend E., Varga P., 2000: The temporal variation of the spherical and Cartesian multipoles of the gravity field: the generalized MacCullagh representation, *Journal of Geodesy*.72, 121-143; Varga P.: On the physical meaning of the zonal components of the geopotential. *Journal of Geodynamics*, 2005, 39, 569-577).

A most záródó projekt kutatásai során különböző kétoldalú tudományos együttműködések keretében szorosán együttműködtünk belga (University Liège, Institute of Astrophysics and Geophysics), francia (Observatoire d’Paris, International Earth Rotation Service-IERS), német (Stuttgart University, Institute of Geodesy), olasz (Department of Earth Sciences, University of Trieste; Earth Science Department, University of Rome; Istituto Nazionale di Geofisica), orosz (OTA Shirshov Oceanographic Institute) és lengyel (Geophysical Institute of Polish Academy of Sciences) kutatókkal. Ezen együttműködések eredménye többek között, hogy földmágneses (a földmágneses tér paleointenzitása) és paleorotációs adatbázisokat tudtunk létrehozni (Schreider A.A., Schreider Al. A., Varga P., Denis C., 2008: Variations of the geomagnetic dipole magnitude over the past 400 My, *Oceanologia*, 48, 2, 250-254; Denis C., Rybicki K.R., Varga P., 2006: Secular change of LOD associated with a growth of the inner core, *Astronomisches Nachrichten*, 327, 4, 309-313) illetve felhasználni (IERS adatbázisai).

Az általunk vizsgált földforgás változások két szempontból is kettős szemléletet igényelnek.

1.) A Föld forgási vektorának vizsgálata két részre oszlik:

- a nap hosszúság (LOD-length of day) változásainak vizsgálata, ami tulajdonképpen a vektor tengelymenti összetevő változások megismerésére irányul
- a pólusmozgás (PM-polar motion) kutatás tárgyát a forgási vektor két egyenlítői összetevője képezi.

A kettőség létrejöttének oka eredetileg azzal volt összefüggésben, hogy a megfigyeléseket két egymástól különböző csillagászati módszerrel végezték. Mára ez az észlelési probléma megszűnt, mivel a modern ürgeodéziai módszerekkel (VLBI, LLR, SLR, GPS) a vektor három komponense együttesen figyelhető meg. Ugyanakkor

a naphosszúság változásai teljesen eltérő kapcsolatban állnak az őket érő vagy az általuk befolyásolt geodinamikai folyamatokkal, mint a pólusmozgás. Ennek oka elsősorban az, hogy az LOD a Föld energia háztartásának legnagyobb komponenséhez a forgási energiához ( $2 \cdot 10^{29}$  Joule) kapcsolódik, míg a PM változásaihoz szükséges energiák ennek ( $10^3$ - $10^4$ )-d részét teszik ki. A két jelenség teljesen eltérő kapcsolatban áll a rájuk ható, illetve az általuk keltett geodinamikai folyamatokkal. Gyakran az is nehezen tisztázható, hogy a földforgás változásai hatnak-e a vizsgált geodinamikai folyamatra, vagy fordítva

2.) A kettős szemlélet másik forrása a Q minőségi tényezőhöz kapcsolódik. A geodinamikai jelenségeket *dekadális* (magas Q minőségi tényező alkalmazásával) és *földtani értelemben vett* (alacsony Q értékek) *időintervallumokban* vizsgáltuk. Kutatási eredményeinket e második kettőződő szempont szerint mutatjuk be.

*A dekadális intervallumok kutatásának eredményei:*

1) A dipolikus földmágneses tér a dekadális periódusok tartományában szoros kapcsolatban áll a Föld forgássebességének változásaival. Megmutattuk, hogy ez a megállapítás egyaránt igaz a dipólus tér erősségére, két irányszögére és excentricitására. A vizsgált kapcsolat jellege nem lineáris, legjobban egy hatodfokú polinommal írható le a mágneses tér és a földforgás sebesség közti kapcsolat. Az ebben az esetben kapott megbízhatósági értékek 0.91 és 0.71 között változnak. Eredményeinkről francia, orosz és belga kutatókkal közösen írt tanulmányban számoltunk be (Varga P., Bus Z., Süle B., Bizouar Ch., Gambis D., Schreider A.A., Denis C.: Variation in the rotation of the Earth and the geomagnetic field; Acta Geod. Geoph. Hung., Vol, 42 (No. 4), 433-448, 2007). 2007-2008 folyamán sikerült kimutatnunk azt is, hogy a geomágneses dipólusos tér változásai kapcsolatot mutatnak a Föld pólusainak helyváltoztatásaival is (Varga P., Bus Z., Süle B., Kis K., Schreider A.A., Bizouar Ch., Gambis D.: Correspondence of EOP and geomagnetic field; Observatoire d'Paris, 226-227, 2008). Ebben az esetben is nem lineáris korrelációs analízissel vizsgáltuk a pólusmozgás két összetevője és a dipólusos mágneses tér közti összefüggést és a kapcsolat meghatározás megbízhatóságát jellemző tényező mindkét esetben jobb volt mint 0.7. A földmágneses térrel kapcsolatos vizsgálataink során jelentős mértékben támaszkodtunk Kis Károly 2009-ben megjelent „Magnetic methods of applied geophysics” című könyvének anyagára (Eötvös University Press, 424 oldal, ISBN 978-963-284-057-4).

2) Az Observatoire d'Paris kutatóival együttműködve a Liouville egyenlet alkalmazásával vizsgáltuk a Föld forgás vektor és a földrengés aktivitás kapcsolatát. Megállapítottuk, hogy még a legerősebb földrengések sem képesek a tengelykörüli forgás sebességét mérhető mértékben befolyásolni. Fordítva ez a kapcsolat fennáll: a naphosszúság változásai bizonyos mértékben hatnak a szeizmikus aktivitás időbeli eloszlására. A pólusmozgás esetére kidolgozott elméleti modellünk felhasználásával 2008-ban megmutattuk, hogy az 1960. évi chilei földrengés ( $M_w=9.5$ , szeizmikus momentum  $2.0 \cdot 10^{23}$  Nm) 130 cm póluselmozdulást keltett, ami a mai megfigyelési pontosság ( $\sim \pm 10$  cm) mellett már kimutatható lenne. A Szumatrai földrengés (2004, szeizmikus momentum  $3.5 \cdot 10^{22}$ ,  $M_w=9.1$ ) 17 cm-el tudta kimozdítani helyéből a Föld pólusát, ami a kimutathatóság határához közeli értéket jelent. A  $M_w \leq 8.5$  magnitúdójú földrengések hatása a pólus helyzetére a jelenlegi mérési pontosság mellett nem mutatható ki (Varga P., Gambis D., Bizouard Ch., Bus Z., Kiszely M., 2006: Tidal influences through LOD variations on the temporal distribution of earthquake occurrences, 233-236, In: “Journées 2005, Systèmes de Référence Spatio-Temporels”, Space Research Centre Polish Academy of Sciences; Varga Péter, 2008: A tengelykörüli forgássebesség és a geodinamikai paraméterek változása a Föld története

során, Magyar Tudomány, 11, 1341-1349). Tudomásunk szerint az általunk kidolgozott módszer az első a szakirodalomban, mely lehetővé teszi a földrengések következtében fellépő pólus elmozdulások közvetlen számítását.

A forgási vektorral kapcsolatos vizsgálatok útján fontos információkhoz juthatunk a Föld folyamatainak megismeréséhez, ugyanakkor LOD és PM kutatásának fontos gyakorlati vonatkozásai vannak, hiszen azok hozzájárulnak az idő meghatározás pontosításához, navigációs módszerek fejlesztéséhez és a földalak meghatározással kapcsolatos kérdések tisztázásához.

*A földtani értelemben vett időintervallumok vizsgálatának eredményei:*

1) Belga és lengyel kollégákkal együttműködve vizsgáltuk a földi nap hosszának növekedését bolygónk történetének utolsó 3.5 milliárd éve során. Megmutattuk, hogy a lassulás mértékének megnövekedését a Proterozoikum és Phanerozoikum határán nem okozhatja a mag fejlődése, sugarának növekedése, mert ez a jelenség max.  $(10\div 100)\mu\text{s}/\text{év}$  lehet szemben a megfigyelt  $1.79\text{ms}/\text{év}$  értékkel. (Denis C., Rybicki K.R., Varga P., 2006: Secular change of LOD associated with a growth of the inner core, *Astronomisches Nachrichten*, 327, 4,309-313; Denis C., Rybicki K.R., Schreider A.A., Tomecka-Suchon S., Varga P., 2010: Length of the day and evolution of the core in the geological past, *Astronomisches Nachrichten* (megjelenik 2010 június-július)). Megmutattuk, hogy szemben a korábban elfogadott feltételezésekkel a Föld sohasem volt a Roché határ közelében, a Föld-Hold távolság a Föld  $4.5\cdot 10^9$  éves története során nagyságrendileg állandó volt. Ugyanez mondható el a földi nap hosszáról is, mely sohasem volt rövidebb 17-19 óránál (Varga P., Rybicki K.R., Denis C., 2006: Comments on fast tidal cycling and the origin of the life, *Icarus*, 2006, 180, 277-280). Ez a megállapítás, fontos feltételt szab a Föld és a földi élet fejlődését leíró elméletek számára a bolygótörténet korai szakaszában. A Föld „szilárd+óceáni” rendszerének földárapály megfigyelésekből levezetett jósági tényezője a Phanerozoikumban  $Q=4.1$  volt, ami az árapálycsúcs  $6.5^\circ$  késését okozza. A késés döntő mértékben az óceáni árapály energiájának a shelfeken a szilárd földnek átadott energia mértékével magyarázható. A jósági tényező az Archaikumban és a Proterozoikumban  $Q=19.1$  volt, ami  $1.5^\circ$  fáziskésést jelent. Azaz a forgássebesség csökkenése a földtörténet elején sokkal kisebb volt, mint bolygónk történetének utolsó félmilliárd éve során (Phanerozoikum). A jelenség magyarázata paleogeográfiai vizsgálataink alapján az, hogy a Föld a Proterozoikum végéig szinte teljesen vízzel volt borítva, azaz lényegesen kisebb volt a shelfek területe, ahol az óceáni árapály a szilárd földnek átadódhatott (Varga P., 2006: Temporal variation of geodynamical properties due to tidal friction. *Journal of Geodynamics*, 41, 140-146; Varga P., 2009: A Föld fejlődésének dinamikája, *Természet Világa*, 140, 10, 438-441).

2) 2008-2009 években olasz-magyar együttműködés keretében megvizsgáltuk a Föld energia háztartását. Arra az eredményre jutottunk, hogy bolygónk éves energia termelése, nagyjából egyensúlyban van az energiafogyasztással. A Föld keletkezésének akreációs energiájára  $(1.9-5.6)\cdot 10^{21}$  youle/év, a mag kialakulásakor keletkező energiára  $(3.2-3.6)\cdot 10^{21}$  youle/év, a rádióaktív bomlásból  $(0.2-2.1)\cdot 10^{21}$  youle/év értékeket kaptam. Ezekkel az adatokkal összevetve az árapály súrlódás energiája szerénynek mondható (egyaránt  $\sim 0.10\cdot 10^{21}$  youle/év). (Riguzzi F., Panza G., Varga P., Doglioni C., 2010: Can Earth's rotation and tidal despinning drive plate tectonics?, *Tectonophysics*). Említésre méltó viszont, hogy a felsorolt energiaforrások időben csökkenő földi energiaforrások. Az egyetlen megújuló az árapálysúrlódás melynek jelentős szerep jut abban, hogy bolygónk energia vesztese (pl. lehülése, tektonikai aktivitás mérséklődése) lassúnak mondható. Az olasz kollégákkal végzett

közös munkán belül a magyar fél feladata volt a Föld energia mérlegének fent vázolt meghatározása is.

3) A földtudományokkal szembeni társadalmi elvárások között fontos szerepet kap a földrengéskockázat mérséklése érdekében végzett kutatás. (Varga P., Mentés Gy., 2006: Strain data and seismicity, *Marees Terrestres Bulletin d'Information*, 141, 11287-11292 ). Ezen a kutatási területen a nagy és közepes földrengések visszatérési idejének számítását végeztük a deformáció hányados megfigyelések adatainak felhasználásával Kostrov és Kasahara elméleti kutatásai alapján . Az eljárás eredményeit döntő mértékben befolyásoló fészektérfogat számítását sikerült pontosítani és kimutatni hogy azok a különböző nagyságú földrengések esetében egyaránt jól közelíthetők azzal a térfogattal, melyekben az utóregések előfordulnak. Az általunk használt eljárás alkalmazásával arra az eredményre jutottunk, hogy a visszatérési idő a legnagyobb ( $M_w \geq 9.0$ ) földrengések fészkeiben hozzávetőleg 250 év, míg a nagy és közepes ( $5.5 \leq M_w \leq 8.0$ ) szeizmikus események estében  $\approx 10^3$  év. (Varga P., 2010: Geodetic strain observations and return period of strongest earthquakes of a given seismic source zone, *Pure and Applied Geophysics*, (megjelenik 2010 május)).

4) A Cassini űrszonda 2005 végén végzett megfigyeléseiből kitűnt, hogy a Szaturnusz egyik holdja, az Enceladus, kis méretei dacára megmagyarázhatatlannak tűnő hidrotermális vulkáni tevékenységet mutat. Ez a tevékenysége unikális: nem ismerünk más hasonló kisméretű objektumot a naprendszerben, mely vulkáni (és tektonikai) aktivitást mutat. A rejtélyes probléma megoldása érdekében elkészítettük az Enceladus radiálisan inhomogén és anelasztikus modelljét (a Q jósági tényező, a sűrűség, a rugalmas hullám sebesség mind a sugár függvényei) (Varga P., 2006: Volcanic activity and tidal heating of Saturn's moon Enceladus, *Marees Terrestres Bulletin d'Information*, 141, 11227-11234 ). A föld esetében a sajátrezgések és a földárapály kutatás terén bevált matematikai apparátust alkalmazva megmutattuk, hogy a Szaturnusz gravitációs hatása, az Enceladus megfigyelt pálya lapultsága esetén, képes e kisebb égitest jégből álló köpenyét mintegy  $3 \cdot 10^8$  év alatt megolvasztani és  $5.3 \cdot 10^8$  év alatt részben párává alakítani. Így megmagyarázható e Szaturnusz hold meglepő tektonikai aktivitása. (Varga P., Süle B., Illés-Álmár E., 2009: On the tidal heating of Enceladus, *Journal of Geodynamics*, 48, 247–252). Az általunk végzett számítás az első, mely működő modellt állít az anomálikus vulkanizmus magyarázatára.

#### *Egyéb tevékenységek*

1.) A projekt tárgykörébe tartozó területek kutatása során olyan érdekes tudománytörténeti adatokhoz jutottunk, melyek feltárják több földtudomány (geodézia, geodinamika, szeizmológia, földfizika) közös gyökereit és fejlődésük közös vonásait (Varga P., 2009: Common roots of modern seismology and of earth tide research. A historical overview, *Journal of Geodynamics*, 48, 241-246; Varga P., 2010: On origins of geodynamics and of modern seismology, *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* (megjelenik 2010 május). Ehhez a tudománytörténeti kutatási területhez csatlakozik a földrengési térképekről, a pályázat keretein kívül írt cikk is (Varga P., 2008: History of early isoseismal maps, *Acta Geodetica et Geophysica*, 43,2–3, 285–307).

2.) A projekt teljes futamideje alatt megfigyeléseket folytattunk a MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetében kifejlesztett mikrobarográfal (Mentés Gy.,2000: Influence of temperature and barometric pressure variations on extensometric deformation measurements at the Sopron Station. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 35,3,277-282). A regisztrálások anyagának közeljövőben tervezett

feldolgozása hozzájárul majd a földforgás paraméterek (LOD és PM) idősorában általunk megfigyelt rövidperiódusú ( $\leq 6$  óra), változásainak értelmezéséhez.

A megfigyelések eredményei a 71952 számú „A földi és az atmoszférikus árapály egyéb geodinamikai hatásai és kapcsolatuk a kőzetek radon kibocsátásával” OTKA téma keretében (témavezető: Mentés Gyula) is hasznosulni fognak majd..

3.) Részben a projekt segítségével sikerült megvalósítani a tarpai földrengésjelző állomást. A projekt eredeti kutatási tervében szereplő földrengésjelző állomást a Bükk-fennsíkon (az anyagi erőforrások elégtelen volta miatt) még nem tudtuk üzembe helyezni.