

A Föld forgás vektorának (forgássebességének és pólusmozgásának) vizsgálata a földtudományok fontos kutatási területe. A vektor időbeli változásai nagyon széles periódustartományban jelentkeznek. A leghosszabbak a geológiai idő léptékűek, míg a legrövidebbek néhány óráig tartanak. A változások fizikai értelmezéséhez számos földtudományi információ forrás (öslénytani, meteorológiai, oceanográfiai, földmágneses, szeizmológiai) analízisére van szükség. Fontos feladat meghatározni azokat a mechanizmusokat, melyek a különböző fizikai terek és a földforgás közötti kapcsolatokat meghatározzák. A folyamatok megismerése fontos a Föld fejlődésének és természeti környezetünk megértése szempontjából.

A „Föld pólusmozgásainak komplex vizsgálata” témában elvégzett kutatómunka során – eredeti terveinknek megfelelően – foglalkoztunk elméleti kérdések matematikai megoldásával, időben változó folyamatok analízisével és értelmezésével, különös tekintettel azok és a földforgás közötti összefüggésekre. A vizsgált, időben változó, folyamatok között említendőek a földi nap hosszának, geometrikus lapultságának és a Föld-hold távolság alakulása bolygónk története során, a mágneses-elektromágneses és a meteorológiai terek hatása a földforgásra. Kutatásaink során különösen figyelemmel voltunk a rotáció következtében fellépő feszültségek és a földrengés aktivitás közötti összefüggésekre.

### Elméleti kérdések:

- Rugalmas, radiálisan inhomogén és cseppfolyós maggal bíró Föld esetére meghatároztuk az extenziós és a rotációs deformáció tenzorok komponenseit szolgáló egyenleteket szektorális, tesszerális és zonális hatások (árapály, külső és a Föld belsejében keletkező erők) esetére (Varga, Mentés, Eperné, 2002). Számításaink alapján adódott, hogy a tektonikai strain és a rotációs strain magnitúdója  $(10^{-7}-10^{-8})\cdot\text{év}^{-1}$  illetve  $(10^{-7}-10^{-8})\cdot\text{rad}\cdot\text{év}^{-1}$ . Ez az érték jó megegyezést mutat a VLBI és a GPS megfigyelések eredményeivel.
- A geodinamika fundamentális egyenlete a MacCullagh egyenlet. Segítségével a Föld gravitációs terének második zonális összetevőjét a poláris és az egyenlítői inerciális momentumok, a Föld tömege és átlagos sugara segítségével határozzuk meg. Kutatásaink során ezen egyenlet általánosítása érdekében hasonló összefüggéseket vezettünk le a negyedik és a hatodik zonális geopotenciális együtthatók esetére is (Varga, 2005). Valószínűsíthető, hogy az általunk kapott egyenlet érvényes a gravitációs tér összes páros zonális komponensére. Ugyancsak sikerült analitikus összefüggést felírnunk a zonális geopotenciális együtthatók időszerinti deriváltjainak esetére, ami fontos eszközül szolgált kutatásainkhoz.
- A Föld geodinamikai viselkedésének vizsgálata céljából rövid (rugalmas Föld) és hosszú időtartamú (geológiai időléptékű) hatások (viszkózus, majdnem cseppfolyós Föld) esetében a teljes inercia momentum időbeli változásait két összetevőre bontottuk fel. Az első - melyet egy térfogati integrál segítségével írhatunk fel - írja le a tömegátrendeződés időbeli változásait, a kifejezést alkotó második, kettős integrált tartalmazó tagja, szolgáltatja a felszínváltozások okozta hatást (Varga, Engels, Grafarend, 2004). Megmutattuk, hogy mindkét összetevőnek van fizikai jelentősége. Szerepük eltérő a rövid (luniszoláris hatás) és a hosszú periódusok (árapályúrlódás) esetében. A hosszú periódusú változások esetén (viszkózus Föld) a két összetevő gyakorlatilag egyforma nagyságú, a rövidebb periódusoknál (rugalmas Föld esete) a tömegátrendeződésekkel kapcsolatos térfogati integrál két és félszer nagyobb, mint a felszíni integrállal jellemzett második tag. Eredményünk azt mutatja, hogy a Föld története során a tömegátrendeződések és a felszínváltozások egyenlő mértékben hatottak a zonális geopotenciál változására.

## Időbeni változó folyamatok vizsgálata:

- A Föld forgássebességének lassulását a földtörténet során az árapályúrlódás okozza. Korábbi vizsgálataink során megmutattuk, hogy ennek hatására a földi nap hossza az utolsó  $(2.5 - 2.8) \cdot 10^9$  év során mintegy 5.5 órával hosszabbodott meg. A rendelkezésünkre álló őslénytani és üledékföldtani adatok statisztikai vizsgálata megmutatta, hogy a forgássebesség lassulás mintegy 80%-a a földtörténet utolsó félmilliárd évére (Fanerozoikum) esik. Az ezt megelőző mintegy kétmilliárd év (Proterozoikum) során az árapályúrlódás mintegy ötször kisebb volt, mint a Fanerozoikumban. Meglepő eredmény az is, hogy a Föld-hold távolság az utolsó  $(2.5 - 2.8) \cdot 10^9$  év során kevesebb, mint 5%-al nőtt. Megmutatható, hogy a Fanerozoikumban a forgássebesség csökkenése nem volt teljesen egyenletes, a Mezozoikumban a naphossz növekedésében egy statisztikai szempontból szignifikáns minimum ismerhető fel. Ennek a forgási minimumnak vizsgálata alapján megállapítható, hogy az korrelál a paleomágneses adatokból meghatározható földmágneses dipoltér momentum értékek minimumával (Varga, 2002). Ez az eredmény elég meglepő, mert a cseppfolyós mag magnetohidrodinamikai modellezéséből az az eredmény adódik, hogy a naphossz és a dipólusmomentum értékek változása közti korreláció csak a néhány évtized hosszúságú periódusok tartományában indokolható a jelenleg használt elméletek alapján. Tekintettel arra, hogy a földtörténeti múltból viszonylag kevés geomágneses dipolmomentum adattal rendelkezünk és azok megbízhatósága is kérdéses részletesen vizsgáltuk azok megbízhatóságát és ismételten igazoltuk, hogy a földmágneses tér momentumának egy mintegy száz millió éves minimuma tapasztalható a Mezozoikum idején (Schreider, Schreider, Varga, Denis, 2005). A rendelkezésünkre álló, a földtörténet utolsó 2.5-2.8 milliárd évét lefedő földforgás adatbázis felhasználásával megkíséreltük a nap hosszának becslését közvetlenül a bolygónk születését követő Hadeon epochára (4.0-4.2 milliárd évvel ezelőtt). Számításainkat először robusztus becslésen alapuló extrapolációval végeztük. Azt az eredményt kaptuk, hogy az említett időszakban a földi nap hossza 17.5 óránál hosszabb és 19.5 óránál rövidebb volt (Varga, 2002,2003). Ezt az extrapolációs becslésből adódó eredményt nem tekinthetjük megbízhatónak, alátámasztásra szorul. Az alátámasztást elősegítheti az árapály karakterisztikus idején alapuló vizsgálat. Ennek érdekében a Föld-hold rendszert egy erősen csillapított oszcillátorként kezeljük. Az oszcillátor viselkedését leíró differenciálegyenletbe beírtuk a Föld-hold rendszerre vonatkozó paramétereket. Az így kapott egyenletet különböző karakterisztikus időköt feltételezve (7.5 és 10 milliárd év), 15.5 óra alsó és 20 óra felső értéket kaptunk. Ez az eredmény meglehetősen jól egyezik az extrapolációból kapottal. Mindez azt igazolja, hogy a Föld-hold rendszer a Hold keletkezését követően rendkívül gyorsan kialakult (Varga,2006). Tudomásunk szerint ez az eredményünk jelenleg az egyetlen kísérleti igazolása a Hold keletkezését egy Marshoz közeli tömegű égitestnek Földbe történő becsapódásával magyarázó „giant impact” elméletnek. A becsapódási elmülethez tartozó modellszámítások mindegyikéből az adódik ugyanis, hogy a Hold a becsapódást követően rendkívül hamar kialakult és közelítően arra a pályára került, melyen ma is található. Számításaink eredményeként elvethetőek azok az elméletek, melyek a földi élet kialakulását bolygónk kezdeti gyors forgásához kötik (a nap hossza  $\leq 10$  óra) (Varga, Rybicki, Denis, 2006).
- A Föld-hold rendszer történetére vonatkozó számításainkból adódik, hogy bolygónk geometriai lapultsága az általunk vizsgált három milliárd év során mintegy 70%-al csökkent. Ezen jelentős változás döntő része az utolsó félmilliárd évre, a Fanerozoikumra esik. Ebben az időszakban a feltételezett eredeti forgási energia mintegy harmada veszett el. Ezért jelentős feszültségeknek kellett felhalmozódnuk a földköpeny viszonylag merev és vékony legkülső részében. A jelenség következtében végbemenő feszültség felhalmozódás a  $45^\circ$  szélességeken extrémális kell legyen. Ez tükröződhet abban a megfigyelési eredményben miszerint a XX. század során felszabadult sekély fészekmélységű földrengések energiája

$2.5 \cdot 10^{18}$  J ezen a szélességen míg az egyenlítőn  $2 \cdot 10^{18}$  J,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  és  $75^\circ$  szélességeken pedig  $1.7 \cdot 10^{18}$  J,  $1.6 \cdot 10^{18}$  J,  $1.5 \cdot 10^{18}$  J és 0 (Varga, Bus, Gribovszki, 2005, Varga 2006).

A szilárd belső mag korára vonatkozó becslés alapján vizsgáltuk annak lehüléséből eredő növekedését. E növekedés természetesen ellentétben az árapálysúrlódással gyorsítja a Föld tengely körüli forgását. Ez a gyorsító hatás ( $\leq 10$   $\mu$ s/évszázad) mindenképpen sokkal kisebb mint az árapálysúrlódásból adódó 1.72 ms/évszázad érték (Denis, Rybicki, Varga, 2006).

- A forgássebesség rövidperiódusú változásai közül (1) a földrengések és a földforgás kapcsolatával, (2) a globális hőmérséklet változások hatásával foglalkoztunk elsősorban valamint felkészültünk a (3) légnyomásváltozások és a forgássebesség ingadozások közti kapcsolat műszeres megfigyelésére és vizsgálatára.

(1) A globális földrengés aktivitás és a Föld forgás közti kapcsolattal összefüggő kutatómunka során modellvizsgálatok eredményeire támaszkodva megállapítottuk, hogy még a legnagyobb földrengések esetében is a keletkező naphosszúság változások (LOD -length of day) lényegesen kisebbek, mint a mérési pontosság. Hasonló megállapítás tehető a pólusmozgások (PM –polar motion) esetében is:

Model	LOD ( $\mu$ s)	PM (cm)
Chile(1960)	8.0	60.0
Alaska(1964)	4.5	18.0
Sumatra(2004)	2.7	2.5
Pontosság	10.0	2-3

Vizsgálataink alapján az is megállapítható, hogy – szemben a szakirodalomban elfogadott nézetrel – nem a földrengések hatnak Földforgás vektorra, hanem fordítva a LOD változásai képesek befolyásolni a földrengések kipattanásának időpontját. Kapcsolatot valószínűsítettünk a naphossz változások és a földrengés aktivitás időbeli eloszlásai között. (Varga, Gambis, Bus, Bizouard, 2005).

A kutatókat régóta foglalkoztató kérdés: képes az árapály triggerelő hatást gyakorolni a földrengésekre? Az általunk végzett számítások eredményei azt valószínűsítik, hogy a két jelenség között szignifikáns kapcsolat a hosszúperiódusú (zonális) árapály esetében képzelhető el elsősorban. Mégpedig úgy, hogy az árapály hat a naphossz értékére és az így keletkező forgási energia változások befolyásolják a földrengések kipattanásának időpontját ( Varga, Gambis, Bizouard, Bus, Kiszely, 2006). A forgási energia  $E_{rot}$  változását leíró egyenlet

$$\Delta E_{rot} = 1/2 C \omega \Delta \omega = -1/2 C \omega^2 \Delta LOD \cdot (LOD)^{-1}$$

(ahol C a poláris inercia momentum és  $\omega$  a szögsebesség) segítségével a legjelentősebb zonális árapályhullámok esetében létrejövő forgási energiaváltozásokat a következő táblázat mutatja:

Árapályhullám	Periódus (nap)	$\Delta LOD$ ( $10^{-4}$ )	$\Delta E_{rot}(10^{20}J)$
18.6 év	6798.37	-1.3	3.22
$S_a$	365.26	0.2	5.44
$S_{Sa}$	182.62	1.4	3.46
$M_m$	27.55	1.5	3.71
$M_f$	13.66	3.0	7.42

A földrengések energiája ( $\text{Log } E=11.8+1.5M$ ) különböző magnitúdó értékek esetében:

$$M=6.0 \quad 6.3 \cdot 10^{13} \text{J}$$

$$M=7.0 \quad 2.0 \cdot 10^{15} \text{J}$$

$$M=8.0 \quad 6.3 \cdot 10^{16} \text{J}$$

$$M=9.0 \quad 2.0 \cdot 10^{18} \text{J}$$

Látható: a zonális árapály által keltett  $\Delta\text{LOD}$  változások jelentős hatást gyakorolnak a  $\Delta E_{\text{rot}}$  forgási energia értékére, de eddigi vizsgálataink során még nem tudtuk hatásukat a földrengés aktivitás időbeli változásában kimutatni.

(2) Az elektromágneses Schumann rezonancia jelensége lineáris kapcsolatban áll a globális hőmérsékletváltozásokkal. Több mint három év hosszúságú GPS adatokból levezetett LOD és PM adatsort hasonlítottunk össze a Schumann rezonancia megfigyelések adatsorával az éves és annál rövidebb periódusok tartományában kereszt kovariancia számítások útján. Megállapítottuk, hogy a PM adatsorok fázisukat tekintve mintegy 25 nappal elmaradnak a Schumann rezonancia idősorok, azaz a globális hőmérsékletváltozások mögött (Varga, Groten, Sători, Závoti, 2006). Ugyanakkor a LOD és a Schumann rezonancia adatsorok összehasonlítása ennél sokkal bonyolultabb képet mutat. E kérdés további vizsgálata a közeljövő fontos kutatási feladata.

(3) A forgási vektor értéke jelentős mértékben függ a légkör sűrűség eloszlásától és ennek időbeli változásától. A sűrűségváltozások megfigyelés céljából az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetében mikrobarográfot fejlesztettek ki (Mentes, 2002), mely sikeresen üzemel az Intézet Sopron-Bánfalván (Eperné, Mentes, 2002) és Budapesten működő obszervatóriumaiban. A műszerek segítségével sikerült a forgásvektorra is ható légköri árapály nagyfelbontású megfigyelése (Mentes, 2004)

### Szeizmológiai alkalmazások

A földforgás és a szeizmicitás közötti kapcsolat vizsgálata során szerzett tapasztalatainkat a földrengések gyakoriságának becslésére lehet felhasználni. Így lehetőség nyílik a földrengés prognózis eddigiektől eltérő módon történő megközelítésére. A korábban levezetett deformáció tenzor komponensek felhasználásával, a Kostrov egyenlet segítségével lehetőség nyílik a deformáció hányadosok ( $d\varepsilon/dt$ ) meghatározására egy adott  $\Delta T$  földrengés visszatérési időintervallum feltételezése mellett. Az első táblázatban az eddig megfigyelt öt legnagyobb földrengés esetében a deformáció hányadosokat  $\Delta T=250$  év esetére számítottuk. Az így kapott deformációhányados értékek reálisak, jól közelítik a geodéziai eszközökkel megfigyelt értéket. Következésképpen a visszatérési időbecslés nagyságrendileg megbízhatónak tűnik.

Hely	Év	Mw	$d\varepsilon/dt$
Kamcsatka	1952	9.0	$8.6 \cdot 10^{-7}$
Alaszka	1957	9.1	$9.8 \cdot 10^{-7}$
Chile	1960	9.5	$1.5 \cdot 10^{-6}$
Alaszka	1964	9.2	$1.1 \cdot 10^{-6}$
Észak Szumatra	2004	9.0	$8.6 \cdot 10^{-7}$

A második táblázatban szereplő földrengések közül az első három nagy, de az első táblázatbelieknél lényegesen kisebb, míg a két alsó a Kárpát medence két jelentős eseménye.

Hely	Év	Mw	dε/dt
Gujarat	2001	7.6	$5.0 \cdot 10^{-4}$
Kobe	1995	6.9	$3.3 \cdot 10^{-5}$
Boumerdes	2003	6.8	$2.8 \cdot 10^{-5}$
<i>Komárom</i>	<i>1763</i>	<i>6.3</i>	<i><math>1.2 \cdot 10^{-5}</math></i>
<i>Dunaharaszti</i>	<i>1956</i>	<i>5.6</i>	<i><math>2.3 \cdot 10^{-6}</math></i>

Amásodik táblázatban szereplő dε/dt értékek túlságosan nagyok, nincsenek összhangban a megfigyelt  $10^{-6}$ - $10^{-7}$  értékekkel. Az összhang a megfigyelések eredményeivel az intraplate, Gujaratban (India) kipattant földrengés esetében akkor állítható helyre, ha  $\Delta T \sim 2.5 \cdot 10^4$  év. Kobe (Japán) és Boumerdes (Marokkó) esetében ezer év nagyságrendű visszatérési idővel számolhatunk. Hasonló a helyzet az 1763. évi komáromi földrengés esetében is, míg Dunaharaszti esetében ~500 éves visszatérési idő adódik (Varga, Kiszely, Bus, 2004, Varga, Bus, Gribovszki, 2005).

Vizsgálataink alapján valószínűsíthető:

- 1.) A szeizmikusan aktív – a tektonikai lemezek ütközési zónáinál található – zónákban a deformáció hányados értéke  $\sim (10^{-7} - 10^{-6})$  megfelelően megválasztott visszatérési idő esetében. A merevnek tekinthető lemezek belsejében csak  $10^4$  év visszatérési idő elfogadása esetében adódnak realizisztikus dε/dt értékek.
- 2.) A geodéziai deformáció mérések használhatóak lehetnek a különböző földrengéses zónákban várható visszatérési időtartam becslésére (20-30)km bázisvonalon elért  $10^{-8}$  relatív pontosság esetén.