

A Föld mélye – a kéregtől a földmagig

Bevezető

Az elmúlt évtizedek gyors technikai fejlődése lehetővé tette, hogy a Föld belső szerkezetét jobban megismerjük. Evvel sikerült a szilárd Földről olyan elképzelést kialakítani, amelynek alapján mind a múltbeli folyamatokra, mind a jövőben várható eseményekre vonatkozóan képet tudunk alkotni.

Nemcsak a várható folyamatokat, hanem a kialakuló geológiai szerkezeteket is előre lehet jelezni. Bár a Föld mélyének szerkezetére és folyamataira vonatkozó kérdések távol esnek a mindennapi ismereteinktől, az emberiség alapvető szükségletei, például a vízellátás, az erőforrások, a természeti katasztrófák elleni védelem és a földi környezet romlásának nyomon követése szempontjából ezeknek mégis meghatározó jelentősége van.

„A Föld mélye” problémakör két kulcskérdésre összpontosul:

- Hogyan érthető meg még jobban a Föld felszínén zajló (később tárgyalandó) tömegmozgás és annak visszahatása a Föld mélyének körfolyamataira?
- A Föld folyamatairól szerzett alaposabb ismereteink miként vezetnek el még pontosabb előrejelzéshez?

A fenti témákban történő kutatások és fejlesztések rendkívül sokfélék, és az alábbi területeken különösen nagy erőfeszítésekkel folynak:

- a „in situ” és „real time” (valós helyű és idejű) monitoring (környezeti megfigyelő) programok, beleértve a műholdas, talaj- és fúrólukbeli megfigyelőrendszereket,
- a geomechanikai és geokémiai laboratóriumi eszközök,
- a geoinformációs adatbázisok, melyek egyaránt tartalmaznak történeti adatokat globális és lokális változásokról, valamint adatokat a természetes és emberi élőhelyek sérülékenységéről,
- ismeretek a földtani mozgások modellezéséről és szimulációjáról, illetve a kockázat- és a hatás becsléséről.

A Föld belső szerkezetét többféle, egyre nagyobb teljesítményű módszerrel vizsgálják. A szeizmikus (robbantásos) módszer segítségével eljutottunk a földköpeny és -kéreg térbeli szerkezetének jobb megismeréséhez. A medencékben felhalmozódott üledékek elemzése révén pedig a geológiai idők során képződött üledékekbe íródott változásokat tudjuk kapcsolatba hozni a Föld mélyének folyamataival.

A szilárd kőzetek „átvilágításának” (geofizikai) módszerei lehetővé tették a Föld külső kérgé (a litoszféra) változásának jobb megértését. Megtudtuk, hogyan alakul a litoszféra a kéreglemezek térbeli mozgásából származó nyomás hatására. A módszerek annyit fejlődtek, hogy a geológusok meglehetősen pontos, években kifejezett (földtani) kort tudnak meghatározni. Ezáltal lehetséges a tektonikai és felszíni folyamatok sebességének megállapítása, aminek segítségével a különféle felszínt alakító erőket egymástól el lehet különíteni. A mesterséges holdak lehetővé tették, hogy mind pontosabban vizsgáljuk a felszín függőleges mozgását is. A felszín időbeli változásait ma már annyira megbízhatóan ismerjük, hogy lehetséges az üledékképződést és az eróziót (lepusztulást) térben és időben együttesen tanulmányozni. Az üledékek kisebb léptékű, helyi szerkezetének megismerésére (azaz, hogy az emberi test átvilágításához hasonló módon beléjük

lássunk) szeizmikus hullámokon vagy elektromágneses tereken alapuló távérzékelési technológiát alkalmaznak.

Tömegáramlás

A „tömegáramlás” azt a folyamatot jelenti, ahogyan a kőzetek a Föld felszínének bizonyos helyén lepusztulnak, máshol pedig újra felhalmozódnak, továbbá azt, ahogyan a Föld plasztikus belseje válaszol ezekre a fokozatos nyomásváltozásokra. Ez az említett folyamatok mennyiségi megértését foglalja magában.

Az ezen a téren folyó kutatások két korábbi különálló megközelítést egyesítenek: egy részről az egyes felszínközeli és kis térrészre vonatkozó adatsorok nagy időfelbontású vizsgálatát, más részről az egész medencére kiterjedő és hosszú időtartamú adatok tanulmányozását. A négydimenziós (4D, azaz a három térkoordinátát és az időt is figyelembe vevő) szemlélet a szilárd Föld folyamatainak olyan modellezését igényli, amely a szeizmikus leképezés mellett a kisléptékű adatokat is figyelembe veszi. Ha mennyiségileg is szeretnénk leírni a kéreglemezeket mozgó folyamatokat, a Föld mélyének szerkezetéről és folyamatairól nagyfelbontású képekkel kell rendelkezünk.

A Föld mélyének hatása a lemezmozgásokra olyan modellel írható le, amely folyamatvezérelt módon vizsgálja a rendszer teljes egészét. Az új módszerek (többek között a szeizmikus tomográfia, a Föld-megfigyelő űrobszervatóriumok, az óceáni és kontinentális fúrások, a Föld-modellek és az elemzési módszerek), továbbá az ezeket és a globális adatbázisokat együttesen felhasználó kutatások reményt nyújtanak arra, hogy ezen a területen áttörést érhessünk el.

Kulcskérdések

A kontinensek felszíne: kölcsönhatás a Föld mélyének és a felszínnek folyamatai között

A topográfia, vagyis a felszín fizikai alakja a Föld mélyében, a felszínen és a légkörben végbemenő folyamatok kölcsönhatásainak eredménye. A topográfia befolyásolja a társadalmat, nem csupán a felszínváltozás lassú folyamatai révén, hanem a rajta kialakuló éghajlat miatt is. A felszín változásai (a szárazföldön, a vízborítottságban és a tengerszintben végbemenő állandó változás) befolyásolják mind az emberi létet, mind a növény- és állatvilágot. Ha az édesvíz vagy a tenger szintje emelkedik, illetve ha a szárazföld süllyed, az árvizek kockázata megnő, és ez közvetlen hatással van a helyi ökoszisztémákra és a településekre. Viszont a vízszintcsökkenés, illetve a szárazföld kiemelkedése növeli az erózió kockázatát, sőt az elsvatagosodását is.

Ezeket a változásokat természeti folyamatok és emberi tevékenységek egyaránt okozhatják, de ezek mértéke még alig ismert. Az a Föld felszínközeli részének rendszere (az ún. „Sekély Föld Rendszer”) jelen állapota és viselkedése időbelileg nagyon eltérő tartamú folyamatok eredménye. Ezek a folyamatok a következők:

- emelkedés, süllyedés és a folyórendszerekre ható hosszú idejű tektonikai hatások
- a jégkorszak kéregmozgásban megnyilvánuló következményei (a jégfelhalmozódás súlya lenyomja a Föld kérgét és az eredeti helyzet visszaállításához az elolvadástól számítva több 10 ezer évre van szükség)
- természetes éghajlati és környezeti változások az elmúlt évezredekben és
- az erőteljes emberi beavatkozások a 20. században.

Ha előre akarjuk jelezni a Földfelszín változásait, ha ki akarjuk kialakítani a Földrendszer fenntartható használatát, meg kell értenünk az egymással egyidejűleg, de eltérő időléptékben zajló, különféle folyamatokat. Ezen a téren a földtudomány feladata a rendszer állapotának leírása, a változások nyomon követése, az előrejelzés és – másokkal együttműködve – az emberi lét fenntarthatóságát biztosító teendők kidolgozása.

A kutatások különösen a sérülékeny területek tektonikai mozgásait, az ottani felszín alakulását, valamint a tengerszintváltozások és a folyók vízelvezetése közötti kapcsolatot érintik. A bonyolult gyűrődéses-vetődéses hegyláncok területén szabatos földtani előrejelzések készítéséhez különböző tudományterületek szakértőinek összehangolt munkájára van szükség. A geológia, a geofizika, a geodézia, a hidrológia és az éghajlat, továbbá a geotechnológia összekapcsolandó egymással.

Előrejelzés: megfigyelés, rekonstrukció és folyamat-modellzés

A környezetre gyakorolt növekvő emberi hatás egyre inkább sebezhetőbbé tesz bennünket. Ezért szükségünk van tudományos alapokon nyugvó „geo-előrejelző rendszerre”, amely megadja a felszín alakító mélybeli hatók helyzetét és előrejelzi a földrengések, vulkáni tevékenységek és a felszínüllyedés időpontját és erősségét. (Ezek egy részét az emberi tevékenység váltja ki.). Egy ilyen rendszer létrehozása sok tudományterületet érintő feladatot jelent. A szilárd Föld folyamatainak előrejelzése fontos megkövetést jelent az óceán- és légkörtudományi előrejelzésekre, többek között az éghajlati változékonyságra is.

A földtani rendszerek viselkedésének előrejelzéséhez két előfeltétel szükséges: a folyamatok alapos megértése és jó minőségű adatok. A számszerűsített előrejelzésben a legnagyobb fejlődés a modellezés és a megfigyelés terén remélhető, ugyanis a tudományos feltételezés itt találkozik a megfigyelt valósággal. A „megfigyelés, modellezés, folyamatszámítás, optimalizálás és előrejelzés” lépéssorozat az eljárás legelőrehaladottabb változatában egymás után többször végrehajtják, térben és időben is. Ennek eredménye segítségével alakul ki az új koncepcionális előrelépés.

A jelen megfigyelése

A felszín alatti (felszínközeli és mélyebb) térség jelenkori szerkezetének megismerése –bármely léptékről van szó – a földtudományok legfontosabb területét jelentik. Ez egyformán érvényes mind a ma is aktív, mind pedig a már nem működő, de a mai szerkezet kialakulásában egykor szerepet játszott folyamatok tanulmányozására. Az aktív folyamatok vizsgálata e szempontból különösen fontos, mert a folyamatot követő megfigyelések (mint pl. földrengés-tevékenység, a felszín változásai és gravitációs tér) a folyamatmodellezésben kényszerfeltételt jelentenek. Az efféle mérésekből és megfigyelésekből nyert kép elősegíti a múltbeli folyamatok rekonstrukcióját.

A múlt rekonstrukciója

A Föld állandóan változott, de a korábbi fejlődésének nyomai mindmáig megmaradtak. Meg kell ismernünk azt, hogy a litoszféra belső folyamatai, továbbá a külső erők milyen szerepet játszottak az erózió és az üledékfelhalmozódás irányításában.

A litoszféra üledéktakarója nem más, mint a változó környezet visszatükröződése, ami egyszerre leképezi a felszínen, valamint a kéreg, a litoszféra és a köpeny különböző mélységeiben végbemenő deformációkat, illetve tömegáramlásokat. Az elmúlt néhány év felfedezései feltárták a litoszféra tektonikai folyamatai és az üledékképződés közötti összefüggést. Erre jó példa, hogy a Föld lemezeiben lévő feszültségek vezérlik a lemezek felhalmozódó üledéksorozatát, valamint az üledékes medencékben megfigyelt tengerszint-változásokat. Ma már

tudjuk, hogy az aktív tektonikai folyamatok miként hatnak az üledékes medencékre, továbbá a folyadékáramlásra és a ma végbemenő függőleges kéregmozgásra. E jelenségek abban az összetett rendszerben valósulnak meg, amely összekapcsolja a Föld mélyének folyamatait a felszíniekkel.

Mindezek alapján a litoszféra üledéktakarója információt szolgáltat a környezet változásairól, beleértve a felszínen, valamint a kéreg, a litoszféra, illetve a földköpeny különböző mélységeiben zajló deformációt és tömegáramlást is. Az utóbbi néhány évtizedben az üledékes medencék elemzése révén kapcsolódtak össze a (korábban különálló) geológiai és geofizikai szakterületek üledéktani és litoszférabeli elemei. Az aktív tektonika, a felszíni folyamatok és a litoszféradinamika egybekapcsolása kulcsszerepet játszik a medencék és a medencéket körülvevő területek egykori topográfiájának meghatározásában. Egy olyan integrált megközelítés is fontos lenne (a dinamikus topográfia és az üledékes medencék dinamikájának kombinálásával), amely figyelembe venné a medencék nyersanyag- és energiaforrásként (pl. szénhidrogéntárolóként, illetőleg -forrásközetként) játszott társadalmi szerepét. Ráadásul manapság a legtöbb ember ilyen üledékes medencékben vagy azokhoz közel él (partmenti zónákban és deltákban), így a népesség és a népesség lakóhelye is erősen sérülékeny a Földrendszer tevékenysége által okozott földtani kockázatokkal szemben.

A litoszféra-deformáció viselkedése

A köpenyáramlás mikéntje meghatározó jelentőséggel bír a litoszféra-lemezek vastagságára és erősségére, a lemezmozgások és a Föld belsejében végbemenő áramlások közötti csatolások mértékére, az asztenoszférabeli áramlások jellegére és sebességére, továbbá az afféle lokálisabb jelenségekre is, mint például a köpenyáramlás jellege és sebessége, valamint az olvadék kiválasztódása az óceánközepi hátságokban. Annak érdekében, hogy megértsük a szilárd Föld külső részeinek dinamikus viselkedését, nevezetesen a litoszféra-kiterjedés dinamikáját és a kapcsolódó riftesedési és üledékes medencebeli fejleményeket, részletesen kell ismerni a köpenyáramlás különböző zónáit is.

Folyamatmodellezés és érvényesség-vizsgálat

A szilárd Föld folyamatainak modellezése jelenleg átmeneti állapotban van a kinematikus és dinamikus modellezés között. A továbbhaladáshoz szükség lenne a Föld szerkezetével és a rajta és benne lejátszódó mozgásokkal, valamint a földtani folyamatok rekonstrukciójával foglalkozó szakterületek együttműködésére. A szerkezettel kapcsolatos kutatásokban történt előrehaladás (különösképpen a térbeli sebességmodellek megjelenése) megnyitja az utat a Föld mélyében zajló dinamikus folyamatok kutatása előtt. A szerkezet ismerete nélkülözhetetlen előfeltétele a szilárd Föld-beli folyamatok modellezéséhez. A ma végbemenő vízszintes és függőleges mozgásokról, a rekonstruált múltbéli mozgásokról, a hőmérsékleti és egyéb folyamatjellemzőkről összegyűjtött adatok felhasználhatók a dinamikus folyamatokról alkotott elképzelésekhez és azok ellenőrzéséhez. Megfordítva: a folyamatmodellezés eredményei megszabják a jelen megfigyelésre és a múlt rekonstrukciójára irányuló kutatásokat.

A folyamat-dinamika szempontjából az a különleges, hogy láthatóvá válnak a térbeli és az időbeli léptékek összekapcsolásának előnyei. A vizsgálható folyamatok léptéke kiterjedhet a teljes bolygóra, és összeszűkülhet egy-egy üledékes folyamat vizsgálatára. A kutatási mélység mindkét esetben a választott léptékhez illeszkedik.

Jelenlegi feladatok

A modern földtudományok által a lemeztektonika elméletében elért sikerek ellenére akadnak még megoldandó kérdések a kontinensek fejlődésével és a litoszféra, illetve a köpeny dinamikájával

kapcsolatban. A kontinensek növekedési folyamata, vastagságuk, és az alattuk húzódnó köpenyvel való dinamikus csatolásuk nagy figyelmet igényel egy egész sor szakterület részéről.

További tisztázandó kérdés, hogy a kontinensbeli tektonikát milyen mechanizmusok alakítják ki, és ezeknek milyen hatása van a függőleges mozgásra, a felszín változásaira és az üledékes medence képződésére. Elsőrendű fontosságú ebből a szempontból a kontinensek szétszakadása: hogyan bukik le egyik lemez a másik alá, hogy alakulnak ki és pusztulnak a hegységek és mindez hogyan hatott a kontinentális lemezek fejlődésére, illetve az óceánok és kontinensek közti határfolyamatokra. Ugyanilyen fontos az említett folyamatok működési sebessége és léptéke.

A szilárd Földről szóló tudomány területén szerepet játszó folyamatok mennyiségi jellemzéséhez döntő fontosságú a külső és belső erőhatások együttes figyelembe vétele. A kutatás előrehalad a (felső) köpeny és litoszféra szerkezete és folyamatai nagy, átfogó léptékétől kezdve a kéregszerkezet és kéregfolyamatok, valamint a topográfia- és medence-dinamika, továbbá a medencék feltöltődése egyre finomodó léptékében is.

További információk a kutatóknak

A kiválasztott természetes laboratóriumok és analógiák együttes vizsgálata

A múltbeli események és folyamatok feltárásában és a jövő előrejelzésében az analógiák kulcsfontosságú szerepet játszanak. A természetes laboratórium, azaz a Föld, lehetővé teszi számunka, hogy a legkülönbözőbb léptékű folyamatok különböző időszelleteit figyelhessük meg, amelyek külön-külön csak töredékes ismeretet adnak a Föld 4 milliárd éves történetéből.

A földfelszín és a Föld mélyét egyaránt érintő programokat jelenleg dolgozzák ki, ezek lefedik Európát (GEOMOTION, TOPO-EUROPE, EURO-ARRAYS), az USA-t (EARTHSCOPE), valamint az afrikai, illetve a dél-amerikai lemezt. A nagy nemzetközi kutatási együttműködések, mint az Integrált Óceánfúrési Program (IODP), a Nemzetközi Kontinentális Fúrési Program (ICDP) és a Nemzetközi Litoszféra Program (ILP) szolgáltatja azt az alapot, melynek révén ezek a kutatások kiterjedhetnek bolygónk más térségeire is. A kiválasztott természetes laboratóriumokra irányuló kutatások kiegészítik egymást és elvezetnek egy olyan sokmódszeres eljáráshoz, amelyhez fogható más világméretű kutatási programban még nem volt.

Csatolt mélységi-felszíni folyamatok (CODESP)

A modern Földrendszer-megközelítéshez egyrészt szükség van a rendelkezésre álló adatbázisok átfogó integrációjára, másrészt – az ezutáni adatok tárolása és az adatcsere biztosítása céljából – a kapacitás bővítésére. A létező modellezési technikák egyesítéséhez és összehasonlításához össze kell kapcsolnunk a különböző szakterületek eredményeit, és ki kell azokat terjesztenünk teljes 3D (térbeli) esetekre is. A földi folyamatok számszerűsítéséhez az adatbázisok és a modellezési eszközök között „visszacsatolási hurkokat” kell kialakítanunk. Hatalmas információtechnológiai befektetésekre van szükség, valamint a meglévő számítógépes hardverek és szoftverek elterjesztésére. Ezek négy fő témára oszthatók. Jelentősen növelné a módszerek értékét, ha kifejlesztenék a „szilárd-Föld értelmezési, érvényesség-vizsgálati és modellező” központot, amely az összekapcsolt mélységi és felszíni folyamatok (CODESP) „gerincét” értelmezné. Ez a fejlesztés összekapcsolja az integrált hardverek és szoftverek eddig még nem létező készletét, amellyel elérhető a nagy 3D-s adatbázisok korszerű és következetes elemzése.

Összekapcsolt folyamatmodellezés és érvényesség-vizsgálat

A folyamatmodellezés és érvényesség-vizsgálat lehetővé teszi a CODESP által követett mennyiségi megközelítés teljes megvalósítását és optimalizálását. Ebben az összefüggésben két, kölcsönhatásban lévő szempontot kell érvényesítenünk. Az első a numerikus folyamatmodellezésnek az az alapvető képessége, hogy összekapcsolja a geometriai-szerkezeti és mechanikai sajátosságokat a vizsgált folyamatok kinematikai és dinamikai szempontjaival (és adataival). A második szempont pedig az, hogy e képesség segítségével a mennyiségi modellezés és a korszerű elemzési eszközök révén nyert fluxus- és időadatokból származó mennyiségi megkötések döntő szerepet fognak játszani abban a kutatásban (valamint a kutatás vezetésében), amely arra irányul, hogy megfejtjük a Földben lejátszódó térbeli és időbeli folyamatokat.

A jövőbeli kutatások elősegítése

A fiatal kutatóknak a CODESP által kialakított sok tudomány területen történő tervezett képzése nem egyéb, mint befektetés a földtudományok jövőbeli kutatási képessége érdekében. A Földbolygó Nemzetközi Éve keretén belül nemzetközi munkaértekezletet terveznek, amelyen meghívott kutatók kapnak megbízást a javasolt kutatási tennivalók előrevitelére.

Eredeti szöveg: S. Cloething, R. Emmermann, J. Ludden, H. Thybo, M. Zoback, F. Horváth

Fordították: a NYME hallgatói

Lektorálták: Ádám Antal, Szarka László, Verő József