

IDŐ A GEOLÓGIÁBAN – FÖLDTANI IDŐMEGHATÁROZÁS

Haas János, ELTE, MTA Geológiai Kutatócsoport

Árkai Péter, MTA Földtudományi Kutatóközpont Geokémiai Kutatólaboratóriuma

Császár Géza, ELTE, Magyar Földtani Intézet, Regionális Földtani Tanszék

Vörös Attila, Magyar Természettudományi Múzeum Föld- és Őslénytár

A geológia történeti természettudomány

A geológia a Föld külső szilárd burkát felépítő kőzeteket kutatja. Ennek során vizsgálja a kőzeteket alkotó ásványokat, az élet kőzetekbe zárt nyomait, a fossziliákat, továbbá a hasonló körülmények között keletkezett kőzetekből felépülő, 3-dimenziós térbeli alakulatokat, a kőzetesteket. Ahhoz, hogy a kőzetek, kőzetestek keletkezését megértsük, egymással való kapcsolatukat kiderítsük, ismernünk kell keletkezésük folyamatát, gyakran igen bonyolult történetét. Itt lép be a geológiai megismerésbe az idő – a negyedik dimenzió –, amelynek a szerepe kulcsfontosságú. A kőzetek keletkezése, átalakulása, a kőzetekben lejátszódó folyamatok fizikai, kémiai, biológiai tényezőkre vezethetők vissza, de ezek a folyamatok sok esetben olyan hosszú idő alatt játszódnak le, hogy laboratóriumban nem is reprodukálhatók. Gondoljunk csak a földkéregben halmozódó feszültségekre, amelyek a kőzetek lassú deformációjához vezethetnek, de akár pillanatszerűen is kioltódhatnak, törések kialakulását, földrengések kipattanását eredményezve. Vagy például vannak olyan kémiai reakciók, amelyek a Föld felszínén uralkodó körülmények között csak évek, évszázadok vagy évezredek alatt mennek végbe. Ilyen például a hazai hegységeink felépítésében is jelentős szerepet játszó dolomit (CaMg-karbonát) keletkezése, amelyet laboratóriumban kis hőmérsékleten máig nem tudtak előállítani. A biológia területén a fajok kialakulása, az evolúció az a bonyolult folyamat, amelynek megértéséhez – éppen az időtényező fontossága miatt – a geológiai és paleontológiai ismeretek nem nélkülözhetők.

A Föld és a földi élet régmúltjáról szinte kizárólag a kőzetekben lelhető fel értékelhető információk, tárgyi bizonyítékok. Ezért olyan értékes számunkra egy-egy jelentéktelennek látszó szikla, vagy kőfejtő által feltárt, a föld történetének egy szakaszát megőrző rétegsor, amelyet – alapszelvénynek nyilvánítva – igyekszünk természetvédelmi oltalom alá helyezni. Máskor a kőzetekben található kővületek adnak pótolhatatlan információt a múlttól. Persze nem csupán a lenyűgöző dinoszauruszleletekre kell gondolnunk, hanem a csupán tized-, vagy századmilliméter méretű fossziliákra is, melyek a kor meghatározásában sokszor értékesebbek, mint a látványos ősmaradványok.

A geológia többnyire olyan hosszú időtartamokkal dolgozik, amely emberi mértékkel szinte felfoghatatlan. Legtöbbünknek azt is nehéz elképzelni például, hogy az 1860-as években pusztító szárazság idején a Velencei-tó és a Fertő-tó is teljesen kiszáradt, az előbbi helyén katonai gyakorlótér volt. Pedig azóta alig másfél évszázad telt el. Még nehezebb képet alkotnunk a Kárpát-medence 1000–1100 évvel ezelőtti, a honfoglalás, az államalapítás

idején uralkodó, a maitól jelentősen elérő természeti viszonyairól. A régészek joggal mondják, hogy az egyiptomi vagy a mezopotámiai kultúra kezdetei a múlt beláthatatlan mélységébe, 6–7 ezer évre nyúlnak vissza.

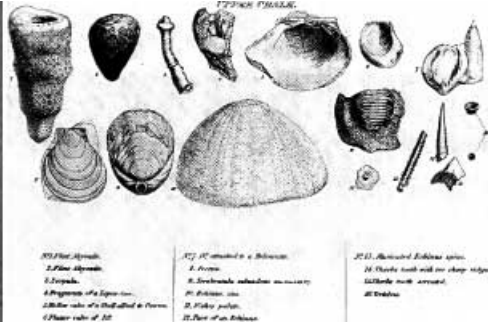
12 ezer évvel ezelőtt még a jégkorszak utolsó nagy eljegesedése tartott, és mivel a sarkvidékeken rendkívül nagy kiterjedésű, igen vastag jégsapkák alakultak ki, a világtenger szintje a mainál több mint 100 méterrel alacsonyabban volt. El lehet képzelni, hogy mennyivel más lehetett a Föld felszínének képe ebben az időben, klímájáról nem is beszélve. A Balaton még nem létezett, a Dunántúli-középhegységet rénszarvascsordák népesítették be. Pedig 10–20 ezer év a geológiában rendkívül rövid idő. A tengerekben ennyi idő alatt többnyire 10–20 cm, de a különösen gyors üledék-lerakódással jellemezhető trópusi tengerekben is csak 1–2 m üledék halmozódik fel. A geológia többnyire millió évekkel számol.

Az Alpok, a Kárpátok és a Dinaridák által körülölelt Pannon-medence 12 millió évvel ezelőtt alakult ki, előtte a mai Alföld területén is hegyláncok emelkedtek. Legnagyobb barnakőszéntelepeink 45 millió évvel ezelőtt, az eocénkorban keletkeztek. Mészköhegységeink uralkodó hányada, így a Bakony, a Vértes, a Budai-hegység, a Bükk, a Mecsek, 200–230 millió évvel ezelőtt sekély trópusi tengerekben lerakódott mészszipapból keletkezett kőzetekből épül fel. A mecseki gránit 330–350 millió évvel ezelőtt jött létre. A Magyarországon ismert legidősebb ősmaradványokat tartalmazó kőzetek több mint 500 millió évesek. Ennél is jóval idősebb, 1,1–1,7 milliárd éves kőzetekből épül fel az Orosz tábla, sőt az Ukrán masszívumban 3,2–3,3 milliárd éves kőzeteket is találtak. A legidősebb, radioaktív méréssel meghatározott földi kőzet Grönlandról ismert, mintegy 3,8 milliárd éves. A Holdról hozott legidősebb kőzetminták és számos meteorit kora 4,6 milliárd év, ezt tekintik a Naprendszer korának és – mai tudásunk szerint – a Föld is ezzel egy időben keletkezett.

A Bibliától a radioaktív kormeghatározásig

Nem mindig gondolkodtak ilyen hatalmas időtávlatokban a Föld korát és történetét illetően. Hosszú ideig, egészen a XVII. század közepéig, a felvilágosodás koráig kizárólag a Biblia tanai adtak támpontot a kezdeteket illetően. A XVI. században a hírneves ír tudós teológus *Ussher* érsek a Biblia gondos tanulmányozása alapján arra a következtetésre jutott, hogy a teremtés Krisztus születése előtt 4004. október 22-én délután 6 órakor volt. Más Biblia-tudósok számításai ettől némileg eltérő eredményre vezettek, de kétségtelen, hogy az Írás szerint a teremtés hat napja mintegy 6000 évvel ezelőtre tehető.

Már az ókori görög kolofoni *Xenophanes*, majd jóval később a XV. század végén a zseniális reneszánsz polihisztor és természetmegfigyelő művész *Leonardo da Vinci* felismerte, hogy tengeri állatok vázai találhatóak a tengerektől távoli hegységek kőzeteiben, és azokat ősi tengerek nyomaként értékelték. *Nicholas Steno* dán udvari orvos és termé-



1. ábra. William Smith és a híres angliai írókréta általa jellemzőnek tartott ősmaradvány-együttese.

szetvizsgáló a rétegzett kőzeteket tanulmányozva 1669-ben arra a következtetésre jutott, hogy a rétegsorban mélyebben lévő üledékrétegek korábban keletkezettek, mint a felettük találhatóak. Ezzel megalkotta a rétegek szuperpozíciójának törvényét, amelyet ma a rétegtan első alaptörvényének tekintenek.

Georges Buffon a XVIII. század talán legnagyobb természetbúvára és a francia felvilágosodás kiemelkedő képviselője volt. A természet rendjére ésszerű magyarázatokat kereső, a dogmákban kételkedő tudósként kétségre vonta azt, hogy a Párizsi-medence sok ezer méter vastag, tengeri állatok vázait nagy tömegben tartalmazó rétegei a bibliai vízözön néhány hónapja alatt rakódhattak volna le. Úgy vélte, hogy ehhez hosszabb időre lehetett szükség. Arra gondolt, hogy a Föld korát egy hasonló méretű vasgolyó lehűléséhez szükséges idő kiszámításával lehetne megközelíteni, és ezt az időt 1749-ben kiadott *A Föld elmélete* című művében 74834 évben határozta meg.

Az angol William Smith csatornaépítő mérnök volt, aki munkája közben, már a XVIII. század végén felismerte, hogy az egymást követő rétegeknek nem csupán sajátos kézzelfogható jellegeik vannak, de ősmaradványaik is eltérőek. E tulajdonságaik alapján akár nagy távolságban lévő rétegeket is azonosítani lehet (1. ábra). Az ő munkásságával kezdődött a rétegtan kialakulása, amely a Föld kergét felépítő kőzettestek térbeli kapcsolatainak tisztázásával és keletkezésük időrendjének meghatározásával foglalkozik, és a geológia egyik legfontosabb tudományterületévé vált.

A korábban már említett Buffon tanítványa volt a XIX. század kezdetének két kiemelkedő francia őslénykutatója, Jean-Baptiste Lamarck és Georges Cuvier, akik az élővilág történetét illetően merőben különböző nézeteket vallottak. Lamarck munkáiban az élővilágnak a környezeti változások miatt lassan, fokozatosan végbement fejlődését hirdette és úgy gondolta, hogy ez év százmilliók alatt történhetett. 1802-ben megjelent dolgozatában a legelsőbb tengeri üledékek korát 900 millió évesre becsülte. Az ősi gerincesek kiváló ismerője Cuvier viszont fixista, azaz a fajok változatlanágának híve volt. Azt az akkor már jól ismert tényt, hogy egymás felett következő rétegsoportok ősmaradvány-együttese különböző, természeti katasztrófákkal magyarázta. Követői azt is feltételezték, hogy a katasztrófákat újratemetések követték és ezek során új fajokkal népesült be ismét a Föld.

A XIX. század első felében az 1820–1840 közötti években vezették be a Föld történetének szakaszokra, időszakokra tagolását, és ekkor nevezték el, írták le a máig érvényben lévő geológiai időszakok jelentős részét (pl. szilur, devon, triász, jura, kréta stb.). 1841-ben John Phillips vetette fel az ősi állatvilág fejlettségén alapuló földtörténeti tagolást, megalkotva a paleozoikum, mezozoikum, kainozoikum fogalmát.

A paleontológusok és a rétegtan kutatóinak szemléletében Charles Darwin 1838-ban felismert és 1859-ban közzétett evolúciós tanai hoztak alapvető fordulatot. Darwin felismerte, hogy az evolúció igen lassú folyamat, de sebességének meghatározására nem volt eszköze. Becslés alapján arra következtetett, hogy a kainozoikum kezdete 300 millió évvel ezelőtt lehetett. Úgy vélte, hogy ennyi idő alatt alakulhattak át az akkori fajok a maiakká. Az ember kialakulásához szükséges időt 15 millió évre tette. Ma már tudjuk, hogy a kainozoikum „csak” 65 millió évvel ezelőtt kezdődött, Darwin tehát a valóságosnál körülbelül ötször lassúbb evolúciós tempót tételezett fel. Az emberi faj kialakulása is gyorsabban, de még így is igen hosszú idő alatt ment végbe.

Thomson, ismertebb nevén lord Kelvin, a világhírű fizikus, a termodinamika úttörője, 1862-ben a kihűlő gázgolyónak tekintett Nap korát mindössze 20 millió évesnek számította, és a belül még mindig meleg Föld korát pedig ennél is jóval rövidebbnek vélte, természetesen nem számolva az akkor még nem ismert radioaktív hőtermeléssel.

Kétségtelen, hogy a radioaktivitáson alapuló kormeghatározás felismerése előtt rendkívül nehéz volt reális becsléseket adni a Föld, illetve az egyes kőzetek korára vonatkozóan. Nagy elismeréssel adózhatunk tehát a XIX. századi magyar geológia kiemelkedő tudósának, Szabó Józsefnek (2. ábra), aki az *Előadások a geológia köréből* című ismeretterjesztő munkájában, 1893-ban rendkívül érdekes üledéktani alapú levezetést adott közre a rétegzett kőzetek korára vonatkozóan. Idézzük fel gondolatmenetének néhány részletét! „Szerencsére, van a változásoknak egy oly nagy ciklusa, mely gondos kutatásra alkalmas és számbeli kifejezést is szolgáltat; a Föld felületének a koptatása ez, mi igen lassu folyamatnak tetszik ugyan, de untalan tart.” ... „A kopadék és a lerakodás tömege egymásnak megfelel; ha tehát megmérjük, hogy valami folyó mennyi anyagot visz a tengerbe, kifejezést kapunk egyrészt arra, hogy azon folyó vízkörnyékéről évenként mennyi kőzetanyag hurcoltatott el, és hogy azzal a mélyed-ményben mennyi új réteg képződött” ... „A Föld rétegtudományában véve, ott, a hol legjobban ki vannak fejlődve, nem kevesebb mint vagy 100,000 láb-ra tehető. Ha ezen rétegek a legsebesebb módon rakódtak le, akkor keletkezésükre 73 millió év kellett; ellenben ha a leglassabb módon, akkor nem kevesebb mint 680 millió év alatt jöttek létre.” Szabó József fenti becslése meglepően reálisnak bizonyult, hiszen a szilárd vázzal rendelkező élőlények maradványait már tartalmazó, legidősebb rétegek kora – azaz a fanerozoikum kezdete – mai ismereteink szerint 545 millió évre tehető.

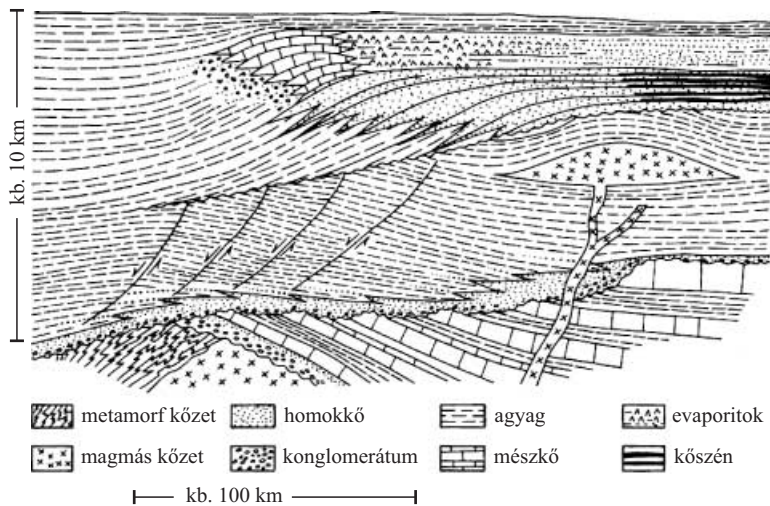
Alapvetően új lehetőséget kínált a földtan számára a radioaktivitás felfedezése, bár ezt a XIX. században még nem tudták. 1896-ban Henri Becquerel francia fizikus a különböző urániumsókkaal végzett lumineszcenciakísérleteit ismertetve egy merőben új jelenségről számolt be: kimutatta, hogy az urániumsók és urániumtartalmú ásványok külső energia (pl. napfény) közlése nélkül is folyamatosan bocsátanak ki láthatatlan sugárzást. Ez a felfedezés messze ható következményekkel járt, a következő évtizedekben az atomfizika és a radiokémia kialakulását és fejlődését indította el.

A Marie Curie által „radioaktivitás”-nak elnevezett jelenség kutatói közül elsőként Ernest Rutherford angol fizikus javasolta 1905-ben, hogy a radioaktív atommagok átalakulási sebességei kőzetek és ásványok korának meghatározására is felhasználhatók lehetnek. Azóta gyakorlatilag minden, természetben előforduló radioizotópot megvizsgáltak, vajon használhatók-e geológiai anyagok datálására. Ehhez az izotópok egész sorának felfedezésére, valamint a különböző kémiai elemek izotópjainak elkülönítésére alkalmas, a J. Thomson által 1914-ben leírt, úgynevezett „pozitív sugár” berendezésre, majd a Cambridge-i Egyetem Cavendish Laboratóriumában 1919-ben F.W. Aston által megalkotott tömegspektrométerre, illetve ennek állandó fejlesztésére volt szükség.

A radioaktivitáson alapuló kormeghatározás úttörői között tarthatjuk számon Hevesy Györgyöt, aki 1923-ban a kőzetekben megfigyelt ólom/urán és ólom/tórium arányból 6 milliárd évet számolt a Föld maximális korára, felismerve a radon eltávozásából származó problémát. 1927-ben a szamárium/neodimium arányból 4 milliárd évet kalkulált, ami már igen közel áll mai ismereteinkhez.

2. ábra. Szabó József, akit a magyar geológia atyjának tekintenek.





3. ábra. A litosztratigráfiai egységek kapcsolata (Hedberg, 1986 nyomán). A rétegsorokban az idősebb egységek általában mélyebben, a fiatalabbak felettük helyezkednek el. Az egyidősek a közettani jellegek fokozatos változásával oldalirányban átmennek egymásba vagy összefogazódnak. A rétegsor lehet folyamatos vagy eróziós határral megszakított. A rétegsorba nyomuló magmás kőzettest fiatalabb, mint az, amelyikbe benyomult.

A tömegspektrométer alkalmazása nyomán az 1950-es évektől jelentős számban végeztek radioaktív kormeghatározást különböző kőzeteken, különböző módszerekkel a világ számos laboratóriumában. Magyarországon az ötvenes évek közepétől az MTA Atommagkutató Intézetében (Debrecen) folynak izotóp-geokronológiai kutatások: elsősorban K–Ar és Ar–Ar módszerrel végeznek világszínvonalú munkát a Kárpát-medence egész területéről származó geológiai mintákon. Az MTA Földtudományi Kutatóközpont Geokémiai Kutatólaboratóriumában az atommaghasadásvány-nyom (fission track) módszerrel értek el jelentős eredményeket.

A geológiai időmeghatározás jelenlegi szemlélete és fontosabb módszerei

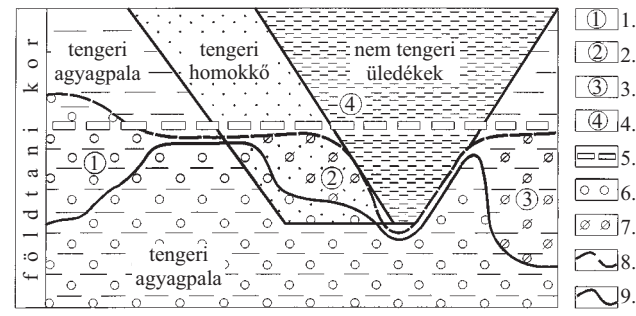
A földtan ma igen sok módszert igyekszik párhuzamosan alkalmazni a földtörténeti események, jelenségek, folyamatok időbeli elhelyezésének érdekében. A módszerek megválasztása a vizsgálandó kőzetek sajátosságaitól és az adott probléma, feladat jellegétől egyaránt függhet. Természetesen igen nagy jelentősége van annak, hogy ma már a kőzetek keletkezési korát években is meg tudjuk adni. Ez azonban nem minden kőzetfajta esetében lehetséges, és jelentős költségekkel is jár. A kőzetek keletkezése gyakran igen hosszú ideig tart, ilyenkor a keletkezési folyamat időbeli lezajlása, egyes részfolyamatok sebességének meghatározása a feladat. Számos esetben a kőzettestek keletkezésének egymáshoz viszonyított ideje, az egyidejű (izokron) szintek megállapítása a legfontosabb. Olyan módszereink is vannak, melyek – bár a keletkezés idejének megállapítását nem teszik lehetővé – bizonyos kőzetekben egészen finom, éves, évszakos vagy akár félnapos időtagolásra alkalmasak, megadva például az üledéklerakódás sebességét, vagy a periodikusan ismétlődő környezeti változások ütemét. Az alábbiakban áttekintjük a geológiai kormeghatározás néhány fontos módszerét, természetesen a teljesség igénye nélkül.

A *kőzetrétegtan* (litosztratigráfia) a kőzetfajták és azok jellegei alapján tagolja, sorolja egységekre a Föld szilárd kérgét (valójában csak a földkéreg felső részét) alkotó

kőzeteket. A litosztratigráfiai egységek (formációk) 3-dimenziós alakulatok és egyúttal a földkéreg építőelemei. A geológiai térképek és térmodellek e kőzettestek síkbeli, illetve térbeli megjelenítését mutatják be. A litosztratigráfiai egységek egymáshoz viszonyított térbeli helyzete ad információt képződésük sorrendjéről. A már említett Steno-féle szuperpozíciós szabály egyike az ilyen relációs értelmezési lehetőségeknek, de ezenkívül számos hasonló szabályszerűséget (egyidejű, korábbi, későbbi relációk) sikerrel lehet alkalmazni a geológia napi gyakorlatában. Ilyen összefüggéseket mutat be a 3. ábra. Az ábra alsó részén üledékes rétegsorba nyomult magmás test látható. A magmás test nyilván fiatalabb, mint a befoglaló kőzettest. Az ábra felső részén üledékes kőzetek összefogazódására látunk példát. Az összefogazódó rétegsorok különböző környezetben, közel egy időben keletkeztek.

Az *életrétegtan* (biosztratigráfia) a rétegeket ősmaradvány-tartalmuk alapján különíti el és sorolja egységekre. Bár „hatásköre” tulajdonképpen az üledékes kőzetekre korlátozódik, a biosztratigráfia mégis több, mint pusztán a sztratigráfia egyik ága. A bevezető részben láthattuk, hogy Smith, Cuvier és a rétegtan más alapító atyái az ősmaradványok felhasználásával tették meg úttörő lépéseiket. Ez nem volt véletlen, hiszen – amint ma már tudjuk – a bioszféra fejlődése folytonos és szakaszos, de mindenképpen egyirányú folyamat, melynek dokumentumai, az ősmaradványok nemcsak rétegazonosításra használhatók, hanem a földtörténeti idő meghatározásához közvetlen információkat is hordoznak. A biosztratigráfia legfontosabb kategóriája a biozóna, amely szintjelző ősmaradványok alapján mutatható ki és párhuzamosítható a Föld különböző pontjain. A biozóna alapulhat egyetlen faj előfordulásán (4. ábra), de több faj együttes előfordulásán is.

4. ábra. A biozóna térbeli kiterjedését egyes meghatározott ősmaradványok konkrét előfordulása határozza meg. A kronozóna az az időtartam, amelyet ezek az ősmaradványoknak az első és az utolsó megjelenése képvisel (Hedberg, 1986 nyomán). Jelmagyarázat: 1. Még nem találták meg a biozónát meghatározó ősmaradványokat, 2. Az őslények váza vagy nyoma nem maradt fenn, 3. Az ősmaradványok a metamorfózis során megsemmisültek, 4. Nem éltek a biozónát jelző őslények ebben a környezetben, 5. Elvileg egykorú (izokron) szint, 6. A biozónát meghatározó őslények időbeli és térbeli elterjedése, 7. A biozónát meghatározó ősmaradványok keletkeztek, de később megsemmisültek, 8. Az eredetileg a kőzetbe zárt, biozónajelző ősmaradványok elterjedésének felső határa, 9. A biozónajelző ősmaradványok ismert, jelenlegi előfordulásának felső határa (A biozóna mai ismereteink szerinti felső határa).

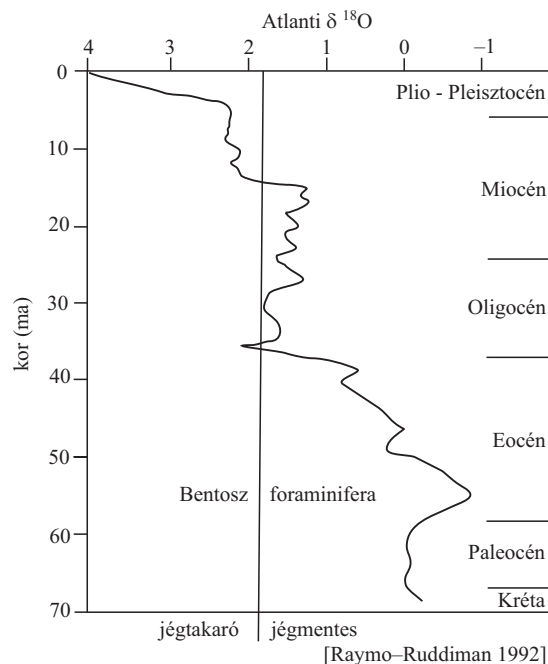


Egy fosszilis faj egyedei akkor használhatók egy időszint követésére – azaz szintjelzőként, vagy régiesen szólva: vezérkövetésként –, ha a faj viszonylag rövid élettartamú és nagy földrajzi elterjedésű volt, megjelenése és eltűnése a teljes elterjedési területen azonos időpontban történt, valamint, ha maradványai gyakoriak, és sokféle környezetben előfordulhatnak. Ez a számos feltétel rendkívül ritkán teljesül egyszerre. Az egymással azonosított (korrelált) biozónák mozaikjából épül fel a biosztratigráfia rendszere.

A *magnetosztratigráfia* a kőzetek mágneses ásványai-ban rögzült, a Föld egykori mágneses mezejére vonatkozó információk értékelésén alapul. Az 1960-as években a kőzeteken mérhető mágneses irányok meghatározása alapján jutottak arra a következtetésre, hogy a földtörténet során a mágneses pólusok gyakran felcserélődtek, azaz mágneses térfordulás következett be. A további vizsgálatok azt is kiderítették, hogy a pólusátfordulások geológiai értelemben igen rövid idő alatt mentek végbe. A magnetosztratigráfia segítségével az egész Földre érvényes időintervallumok, illetve határszintek határozhatók meg, melyek az elmúlt évtizedekben az időkorreláció rendkívül fontos eszközeivé váltak, különösen a földtörténet fiatalabb (kainozoos) szakaszaira vonatkozóan.

A rétegsort regionális üledékhézagokkal tagoló *szekvencia-sztratigráfia* az 1970-es években született, elsősorban a mesterségesen keltett földrengéshullámok értékelésén alapuló geofizikai mérések (szeizmikus szelvények) értelmezésének fejlesztése érdekében. A szekvenciák létrejöttét relatív vízszintváltozásra vezették vissza, amely az aljzat süllyedő–emelkedő mozgásának és a világtengerek millió éves nagyságrendű vízszintváltozásainak az eredője. A millió éves nagyságrendű tengerszintváltozások oka azonban ma is vitatott, és ebből kifolyólag a szekvenciákon alapuló globális korreláció elvi alapjai sem tisztultak meg le.

Mai ismereteink alapján is kielégítően magyarázható viszont a 10 ezer – 100 ezer éves nagyságrendű üledékciklusok kialakulása. A *ciklussztratigráfia* elsősorban erre épül. Ciklusos üledékképződésről akkor beszélünk, ha az egymást követő rétegek sorozatában szabályszerű ismétlődés van. *Milankovic* szerb mérnök, csillagász és matematikus az 1920-as években olyan elméletet dolgozott ki, amely a jégkorszakok kialakulását, az eljegesedési és a felmelegedési szakaszok váltakozását a Föld keringési pályaelemeinek módosulása miatt bekövetkezett besugárzásváltozásokra vezette vissza. A 100 és 410 ezer éves periodicitású excentricitással, a ferdeség kismértékű változásának 41 ezer éves periódusával és a 21,7 ezer év átlagos periodicitású precesszióval számolt. Később az is kiderült, hogy nem csupán a jégkorszaki, hanem különböző korú és különböző környezeti egységekben keletkezett ciklusos rétegsorok is az említett periodicitásokat mutatják. A pályaelemek periodikus változása (az ún. Milankovic-ciklicitás) bonyolult áttételeken keresztül hagy nyomot az üledékes rétegsorokban. A pályaelemek módosulása a besugárzás szezonálisát és ezen keresztül a klímát befolyásolja, de a tengerszintváltozásokra is hatással lehet, amennyiben az adott időben a Föld sarki jégspakával rendelkezik.



[Raymo–Ruddiman 1992]

5. ábra. Az Atlanti-óceán üledékéből származó egysejtű állatok (Foraminifera) mészvázában megfigyelt oxigénizotóp-összetétel változásai a kainozoikum idején (Raymo és Ruddiman, 1992 nyomán).

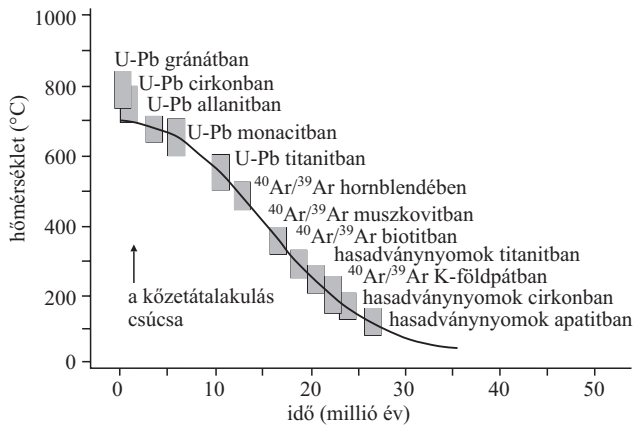
Az utóbbi évtizedben igen gyorsan fejlődő *kemosztratigráfia* az óceánvíz kémiai (elem- és izotóp-) összetételének időbeli változásain alapul. A jelenleg alkalmazott módszerek elsősorban az izotóparányok változására épülnek, és főként az ősmaradványok vázainak vizsgálatán alapulnak. Az 5. ábra az Atlanti-óceán üledéksorában felhalmozódott egysejtű planktonállatok – Foraminifera – mészvázában mutatja az oxigénizotóp-arány változását a kainozoikum folyamán (Raymo és Ruddiman, 1992). A változások elsősorban a víz hőmérsékletének ingadozását tükrözik, ami globális klímaváltozásokra vezethető vissza. Ez ad lehetőséget arra, hogy pontosabban nem ismert korú rétegsorokat az oxigénizotóp-arányok alapján korreláljunk.

A *radioaktív izotópos kormeghatározás* lényege az a felismerés, mely szerint a radioaktív bomlás sebessége egyedül az adott radioaktív atommag stabilitásától függ. A bomlás sebességét külső tényezők (pl. a hőmérséklet, nyomás stb.) nem befolyásolják. A radioaktív kor azt az időt adja meg, amely a vizsgált ásványnak, kőzetnek szilárd fázisban történő kiválása, vagy átkristályosodása óta eltelt.

A radioaktív izotópos kormeghatározásának alapfeltételei a következők:

- a vizsgált ásványban a „szülő”- (radioaktív, elbomló) izotóp és a bomlás eredményeként keletkezett „leány”-izotóp koncentrációiban az ásvány kiválása után végbement változások kizárólag csak a radioaktív bomlás eredményei legyenek (az ásvány kiválásakor csak „szülő”-izotóp legyen jelen);
- az adott izotóprendszer szempontjából a vizsgált ásvány vagy kőzet keletkezésétől a jelenig zárt rendszerként viselkedjék.

Ezek a feltételek azonban a természetben szinte sohasem, vagy csak nagyon ritkán teljesülhetnek. Ezért a radioaktív izotópos kormeghatározás eredményeinek értel-



6. ábra. Metamorf kőzetek ásványainak különböző izotóprendszerekre vonatkoztatott, úgynevezett záródási hőmérsékletei, Spear F.S. (1993) nyomán.

mezése rendkívül összetett feladat, amely a fizikus-geokronológus, a földtan különböző szakterületeit művelő petrográfus, mineralógus, sztratigráfus szakemberek együttműködésével lehet csak sikeres.

E tekintetben alapvető jelentőségű a geológiai objektumok vizsgált izotóprendszere vonatkozó úgynevezett záródási vagy blokkolási hőmérsékletértékeinek meghatározása, amely *Dodson* (1973) nevéhez fűződik. Egy ásvány záródási hőmérsékletét a következő tényezők határozzák meg:

- a dT/dt lehülési sebesség;
- a kémiai diffúzió aktivációs energiája;
- a kristályn belüli diffúziós domének.

A 6. ábrán a kormeghatározásoknál gyakran alkalmazott izotóprendszerek különböző ásványokban meghatározott záródási hőmérsékletei (pontosabban: hőmérséklet-intervallumai) láthatók, viszonylag lassú lehülési sebességet feltételezve.

A fentiek miatt, különböző kőzetfajták esetén eltérő izotóp-geokronológiai módszerek alkalmazhatók, és az értelmezés is eltérő megfontolásokat tesz szükségessé.

Az üledékes kőzetek esetében a radiometrikus kormeghatározás, illetve a mérési eredmények értékelése komoly nehézségekbe ütközik. Az üledékes kőzetek jelentős része ugyanis nem tartalmaz radioaktív kormeghatározásra alkalmas ásványt. Kedvező esetben azonban a kőzetben található az üledékképződés során keletkező vagy az üledékfelhalmozódással egyidejű vulkáni tevékenység során az üledékbe jutott ásványok, melyek kora megadhatja az üledékképződés, illetve a kőzetté válás korát. Más ásványok azonban korábban keletkezett kőzetek lepusztulásából származnak, ennél fogva nem az üledék lerakódásának, hanem a lepusztulási területet alkotó földtani képződményeknek a korát adják meg.

Magmás kőzeteknél az izotópos korok értelmezése a magmatitok képződési körülményeitől, elsősorban a lehülési sebességtől függ. A gyors lehülésű vulkáni kőzeteknél az izotópos korok gyakorlatilag a magmás működés korával egyeznek meg. Lassú lehülésű plutoni (intruzív) kőzeteknél a magmás működés tényleges koránál fiatalabb, úgynevezett lehülési korokat kaphatjuk meg, tehát azt az időpontot, amikor a vizsgált kőzet vagy ásványa az adott izotóprendszer szempontjából zárttá vált.

Metamorf (átalakult) kőzetek esetében a különböző záródási hőmérsékletű ásványok/izotóprendszerek tanulmányozásával lehetőség nyílik a metamorf események ismétlődésének (polimetamorfózis) kimutatására és a metamorf összeletek lehüléstörténetének rekonstrukciójára is.

Geológiai időskála

Napjaink földtudománya a fentiekben tárgyalt, valamint számos, itt nem említett geológiai időmeghatározási, időtagolási módszert együttesen igyekeznek felhasználni a földtörténet, azaz a földtani folyamatok időbeli lefolyásának felderítésére. Ezt a sokoldalú megközelítést nevezik integrált sztratigráfiának. A rétegtani vizsgálatok eredményeként a kőzettesteket geológiai korok szerint úgynevezett kronosztratigráfiai egységekbe sorolják. Ezek időtartamát fejezik ki a geokronológiai egységek, melyek hierarchikus rendszere alkotja a geológiai időskálát, melynek alapjait – mint láttuk – a XIX. század első felében fektették le. Azóta a kutatók folyamatosan dolgoznak a skála tökéletesítésén, az egységek határainak definiálásán és koruk minél pontosabb meghatározásán. A földtörténet fő fejezeteinek, magasabb rangú egységeinek a határát már a XIX. században is az élővilág jelentős változá-

7. ábra. A mezozoikum geológiai időskálája (*Gradstein* és *mtsi*, 1994 nyomán). Az ábra jobb oldalán lévő görbe a rétegtani egységek években kifejezett korának hibatarományát mutatja.

év	idő	időszak	kor	korszak	hiba (\pm) M év
65	Kz			dániai	2 4
70				maastrichti	65 \pm 1
80		kréta	késő	campaniai	
				santoni	
				coniaci	
				turon	
				cenoman	
100				albai	
110		kora		apti	
120				barremi	
130				hauterivi	
				valangini	
				berriasi	
150		jura	késő	tithon	
				kimmeridgei	
				oxfordi	
				callovi	
				bath	
170		középső		bajoci	
				aaleni	
				toarci	
190		kora		plienbachii	
				sinemuri	
				hettangi	
210		késő		rhaeti	
				nori	
				karni	
230		középső		ladini	
				anisusi	
240		kora		olenyoki	
				indusi	
250	Pz	perm		tatár	248,2 \pm 4,8

saihoz kötötték. Ezek többsége valóban drasztikus változásokhoz, globális természeti katasztrófákhoz köthető, amelyek mintegy szelektálták a többnyire már korábban meggyengült élőlénycsoportokat, jöllehet a legnagyobb katasztrófák sem vezettek az élővilág nagy csoportjainak teljes megsemmisüléséhez. Ilyen esetekben természetes határokról beszélhetünk, és ezek megkeresése, pontos meghatározása a feladat. Más esetekben azonban – ez a helyzet a részletesebb tagolást adó, rövidebb időtartamot átfogó egységek (emeletek, illetve korszakok) nagy részének esetében – nem történt a Föld egészére kiható lényeges változás, zavartalan az evolúció, ezért nincs természetes határ, azt valamilyen módon, nemzetközi megegyezéssel ki kell jelölni. A globális geológiai skála minden egységének alsó határát egy konkrét helyen, a Föld egyetlen pontján jelölik ki, amelyet sztratotípusnak, illetve határpontnak neveznek. A határok kijelölése – ami nemzetközi program keretében jelenleg is folyik – természetesen előfeltétele annak, hogy években kifejezett korukat viszonylag pontosan meg tudjuk határozni, de ennek egyéb nehézségei is vannak.

Ma már a kréta időszak középső részéig, hozzávetőlegesen 100 millió évig visszamenve a geológiai időskála években meghatározott kora viszonylag pontos, a határok korát legfeljebb néhány 100 ezer éves hiba terheli. Eddig ugyanis támaszkodhatunk a mai óceánok aljzatán végezett mágneses mérések adataira, kiváló magnetosztratigráfiai skálával, biosztratigráfiai rendszerrel és nagyszámú radioaktív izotópos koradattal rendelkezünk. A fanerozoikum korábbi szakaszait illetően már sokkal kevesebb a közvetlen adat, és a hibahatár emiatt 4–5 millió évre nő (*Gradstein és mtsai, 1994, 7. ábra*). A fanerozoikumnál korábbi, azaz 545 millió év előtti földtörténeti szakaszra nézve még sokkal nagyobb a bizonytalanság, hiszen itt már biosztratigráfiai rendszert nem használha-

tunk. A geológiai kormeghatározáshoz kizárólag a litosztratigráfiai egységek kapcsolatai és a radiometrikus adatok adhatnak támpontot.

A geológiai időmeghatározás módszereinek kidolgozása, rendszerének felépítése és az időskála megalkotása a földtudomány kiemelkedő teljesítménye, amely több mint 200 év kutatásainak, kutatók ezreinek eredményeire épül. A skála alapját egymáshoz kapcsolódó, de független elvi alapokon álló ismeretek hálózata képezi. Az ismeretek természetesen állandóan bővülnek, a skála egyes elemei módosulhatnak, a határok kora pontosabbá válik. A földtörténet utolsó, mintegy félmilliárd éves szakaszára nézve már ma is jól használható, tudományosan sokoldalúan megalapozott időskálával rendelkezünk az élettelen természet és az élővilág változásainak időbeli elemzéséhez. Az időmeghatározás módszereinek és magának az időskálának a fejlesztése azonban ma is a földtudomány egyik legfontosabb feladata. Ebben kiemelkedő szerepe van a fizikai alapú módszereknek, jöllehet a geológiai időtagolás ma és a jelenleg belátható jövőben is az élővilág egyirányú evolúcióján alapul.

Irodalom

- DODSON M.H. (1973): *Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems* – Contributions to Mineralogy and Petrology 40 259–274
- GRADSTEIN F.M., AGTERBERG F.P., OGG J.G., HARDENBOL J., VAN VEEN P., THIERRY J., HUANG Z. (1994): *A Mesozoic time scale* – Journal of Geophysical Research B99 24051–24074
- HEDBERG H.D. (1986): *International Stratigraphic Guide. A Guide to Stratigraphic Classification, Terminology, and Procedure* – ISSC
- RAYMO M.E., RUDDIMAN W.F. (1992): *Tectonic forcing of Late Cenozoic climate* – Nature 359 117–122
- SPEAR F.S. (1993): *Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths* – Mineralogical Society of America, Monograph, p. 799, Washington, D.C.
- SZABÓ J. (1893): *Előadások a geológia köréből* – Természettudományi Társulat, Budapest

INTÉZETEINK, TANSZÉKEINK

BEMUTATKOZIK A PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM KÍSÉRLETI FIZIKA TANSZÉKE

Berkes József, Buzády Andrea, Pálfalvi László

A Tanszék története

A Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Karának Kísérleti Fizika Tanszéke nagyon fiatal az ország más hasonló intézményeihez viszonyítva, mégsem előzmények nélküli. A Tanszék története, fejlődése szervesen összekapcsolódik a felsőfokú fizikaoktatás történetével Pécsen, amely a Pécsi Pedagógiai Főiskola megalakulásával 1948-ban indult.

A Fizika Tanszék az alapítók között szerepelt, melynek első vezetője 25 éven keresztül, nyugdíjba vonulásáig *Jeges Károly* volt. Őt 1973-ban *Litz József* követte,

1983-ig. Ebben az időben a Tanárképző Főiskolán a főiskolai szintű tanárképzés rendszere a minőségi fejlődés jegyében többször átalakult. Ennek megfelelően a fizikaoktatás tematikája állandóan fejlődött, több főiskolai jegyzet, számos ötletes kísérleti eszköz készült, amelyek tanári ankétokon is bemutatásra kerültek. Tudományos kutatómunka már 1957-től folyt a Tanszéken. Az első eredmények az elektrolumineszcencia területén *Jeges Károly* nevéhez fűződtek, természetes, majd mesterséges ön-dioxidon észlelte az elektrolumineszcens hatást. Eredményeiről számos cikkben számolt be. Ezekbe a vizsgálatokba kapcsolódott be *Litz József*, aki több