



SZÉKFOGLALÓ ELŐADÁSOK A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIÁN

Pálfy József

200 MILLIÓ ÉVES TÖRTÉNET:
A FÖLD A TRIÁSZ-JURA HATÁRON



Terintetes Nagy 97

Leendő szabályainak 32. §-a így szól:
"újra választott tag, a külsőt kivétel-
szabályába tartozó dolgozat felolvasásával,
bonyolult megnevezés esetén beüldé-
legfelelt egy év alatt széklet foglalt; külsőben meg-
száza megvan misztócn."

Lehetett esetek, melyekben kivált vidéken la-
gátolhatna a határidőt megtartani: de hallga-
elérni a szabály megnevezés tartatását, amint
"mint összes szabályzatunkat szövegnél terintetes
következésselre figyelmeztetnem J. Aradon
szükségtelen."

Indoklásba hozatik tehát, hogy egyelőre az
1861. 19. §-ot választott székletfoglatás által megnevezés-
tett tagok neve a névelőjéből kitöröltesse, az 1861-
és 1862. választottak a szabályokra emeltesse, jó-
vőre pedig a titolnoki hivatal oda utasítsa, hogy
evidenciában tartás végett az újon választottakat,
míg széklet nem foglaltat, a sorozatba fel ne vegye."

1. jan. 26. 1865.

Nyulaj Már
Fogaraj Zsuzsanna
Hollán Ernő

853
1865

Kemény László
Könyves László
Jóshönné
tag Jolly János
György János

Pálfy József

200 MILLIÓ ÉVES TÖRTÉNET:
A FÖLD A TRIÁSZ-JURA HATÁRON

SZÉKFOGLALÓK
A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIÁN

A 2013. május 6-án megválasztott
akadémikusok székfoglalói

Pálfy József

200 MILLIÓ ÉVES TÖRTÉNET:
A FÖLD A TRIÁSZ-JURA
HATÁRON



Magyar Tudományos Akadémia • 2014

Az előadás elhangzott 2013. november 19-én

Sorozatszerkesztő: Bertók Krisztina

Olvasószerkesztő: Laczkó Krisztina

Borító és tipográfia: Auri Grafika

ISSN 1419-8959

ISBN 978-963-508-777-8

© Pálfy József

Kiadja a Magyar Tudományos Akadémia
Kiadásért felel: Lovász László, az MTA elnöke
Felelős szerkesztő: Kindert Judit
Nyomdai munkálatok: Kódex Könyvgyártó Kft.

Bevezetés

A Föld több mint 4,5 milliárd éves történetének utolsó bő félmilliárd évről egyre megbízhatóbb, nagy felbontású képiünk van. A geológiai, azon belül elsősorban a paleontológiai és geokémiai adatok alapján az élővilág és a környezet folytonos, de tág határok között ingadozó ütemű változása rajzolódik ki. Különös figyelmet érdemelnek a rövid időn belül nagy léptékű változásokkal járó események. Annál is inkább, mert kezdjük megérteni, hogy az ember tevékenységének hatására épp egy ilyen esemény lezajlása vette kezdetét. Analógiákért érdemes tanulmányozni a földtörténeti példákat, amelyek egyike a triász és jura időszakok határán lezajlott esemény. A székfoglaló előadás áttekinti a triász végi kihalással és környezetváltozásokkal foglalkozó friss tudományos eredményeket, köztük a munkatársaimmal együtt végzett eddigi kutatásainkat.

A triász és a jura időszakok határáról beszélve mintegy 200 millió évvel kanyarodunk vissza az időben a mai korhoz képest. Hadd érzékeltessem a földtörténeti időnek ezt a szinte felmérhetetlen távlatát egy hasonlattal. Ha a saját életutamat a földtörténethez arányítom, nem is az egészhez, amely több mint 4,5 milliárd év, hanem annak csak az alig több mint 10%-nyi, legjobban ismert utolsó szeletéhez, amit fanerozoikumnak hívunk, és amit a kambrium 541 millió évvel ezelőtt kezdődött időszaka nyitott meg, akkor nézzük meg, hova is esne ez a 200 millió évvel ezelőtti történet, amelyről az előadás szól. Eredményül azt kapjuk, hogy 1994 tájára, és ez azért érdekes, mert akkor én épp Kanadában doktoranduszként jura időszaki tanulmányokat folytattam. Néhány évvel korábban az ELTE-n geológus hallgatóként szakdolgozatom triász időszaki

ősmaradványokkal foglalkozott, brachiopodák vizsgálatán keresztül a triász hétköznapi világát kutattam.¹ Majd Kanadában a Brit-kolumbiai Egyetemen (UBC) a jura hétköznapi világba kaptam bepillantást a mesterszakos,² majd a doktori kutatásaim kapcsán,³ és csak miután hazajöttem, akkor vált számomra igazán világossá, hogy a hétköznapi világ mellett a földtörténetben az igazi izgalmat az egyes időszakok határán lezajlott események jelentik. Így fordult az érdeklődésem a triász és a jura határának eseményei felé, amely az előadás témájául szolgál.

Hol a határ?

Először nézzük meg, hol húzzuk meg a triász és a jura időszakok határát, hová esik ez a földtörténeti időben, hol tanulmányozható térben, azaz földrajzilag, hogyan definiáljuk, illetve hogyan definiálunk egyáltalán a geológiában egy rétegtani határt. A 200 millió évvel ezelőtti Földre pillantva lenyűgöző az akkori ősföldrajz gyökeres eltérése a maiétól: egyetlen szuperkontinens létezett, a Pangea.⁴ Annak északi és déli részeit mutatja az *1. ábra* térképe, amely feltünteteti azoknak a lelőhelyeknek és szelvényeknek a helyeit, ahol a triász-jura határ eseményeinek nyomát rétegsorokban tanulmányozhatjuk.⁵ Számos helyen ezt személyesen is megtettem, de az előadásban sok hazai és külföldi kollegám eredményeire is támaszkodom. Körbejárhatjuk a Földet, körbejárhatjuk a Pangeát, hogy triász-jura határszelvényeket vizsgáljunk, de Magyarország abban a szerencsés helyzetben van, hogy itt a határainkon belül három különböző területen is tudunk olyan rétegsorokat vizsgálni, amelyek hozzásegítenek a 200 millió évvel ezelőtti események megértéséhez.⁶ A legtöbb szó Csóvárról fog esni, ahol a Duna-balparti rögök területén, Budapeستől autóval alig egy órányira, intraplatform medencében lerakódott folyamatos karbonátos rétegsorban vizsgálhatjuk a triász-jura határt. A Bakonyban és a Gerecsében a karbonátos rétegsorokban egy érdekes üledékhézag van, amelynek a jelentőségére a későbbiekben még visszatérünk, a Mecsekben pedig terasztrikus eredetű kőszenes rétegsorokban őrződtek meg a 200 millió éves események nyomai.⁷



1. ábra. Ósföldrajzi térkép ~200 millió évvel ezelőtt, a triász-jura átmenet idejéből. A Közép-atlanti magmás provincia képződményeinek ismert felszíni elterjedését a sötétszürke, feltételezett elterjedését a kissé világosabb szürke árnyalat jelöli. A számok Észak-Amerika és ÉNy-Afrika fontosabb riftmedencéit, illetve a tengeri biosztratigráfia, $\delta^{13}\text{C}$ és radioizotópos korok szempontjából fontos szelvényeket jelzik. 1: Fundy-medence; 2: Hartford-medence; 3: Newark-medence; 4: Culpeper-medence; 5: Argana-medence; 6: Magas-Atlasz; 7: Északi-Mészköalpok; 8: Magyarország; 9: Nyugati-Kárpátok; 10: Déli-Alpok; 11: Appenninek; 12: Dél-Németország; 13: Lengyel-medence; 14: Észak-Németország; 15: Dániai-medence; 16: DNy-Anglia; 17: Kelet-Grönland; 18: Queen Charlotte-szigetek; 19: Nevada; 20: Peru.
Pálfy és Kocsis nyomán, Ruiz-Martínez et al.⁴ alaptérképe felhasználásával

Csővár környékén a Várhegy oldalának feltárásait az 1990-es évek vége óta intenzíven kutatjuk, és talán nem szerénytelenség azt mondani, hogy sikerrel fogadtattuk el a nemzetközi kutatói közösséggel a szelvény jelentőségét.^{8,9} A folyamatos rétegsorban ammoniteszek alapján viszonylag jól el lehet határolni a triászt és a jurát, igaz, hogy van köztük egy néhány méteres szakasz, ahonnan nincs biosztratigráfiai adatunk.¹⁰ A mikrofauna-csoportok közül a konodonták és a radioláriák fontosak a határ megvonásában. Legújabbán Ozsvárt Péter kollegám, előtte Elizabeth Carter kanadai kolleganóm, előttük Dosztály Lajos fiatalon elhunyt kollegám, elsőként pedig Heinz Kozur vizsgálta az itteni radioláriákat, amelyek szintén azt mutatják, hogy van egy legfiatalabb triászba sorolható együttes és egy attól nagyon különböző, a legidősebb jurát jelző társaság.

Egy rétegtani határ nemzetközi definíciója „aranyzög” beverésével, hivatalos nevén globális sztratotípus szelvény és pont (GSSP) kijelölésével történik. Ezért a megtisztelő címért Csővár nem versenyezhetett, mert ugyan itt is előfordulnak ammoniteszek, de pont a kritikus szakasról nem kerültek elő ősmaradványok. Ennek a címnek a szerencsés nyertese viszont nincs messze tőlünk: az Északi-Mészközpokba, Tirolba, a Karwendel-hegységben található Kuhjoch szelvényébe került az aranyzög.¹¹ Nemcsak szimbolikusan, hanem fizikai valójában is, véletlen folytán egy éppen augusztus 20-án megtartott ünnepség keretében avatták fel 2011-ben (2. ábra). A ceremónia alkalmából készült képen mindenki mosolyog, mégis úgy vélem, nem volt kellőképpen megfontolt ez a döntés. A határ megvonása ammoniteszekre alapul, az első, hagyományosan a legidősebb jurába tartozónak tekintett ammonitesz nemzetség, a *Psiloceras* első képviselőjének megjelenésére. A szelvényt először egy ködös októberi napon láttam, és ez a ködös, borús kép máig megmaradt bennem. Hogy megértsük, mi a probléma a triász-jura határ ammoniteszalapú definíciójával, ahhoz ugorjunk egy nagyot térben. Menjünk el Tibetbe, ahol föl kell kapaszkodnunk 4640 m tengerszint feletti magasságra a Lhasát Katmanduval összekötő „Barátság út” mentén, és itt egy olyan triász-jura határszelvényt



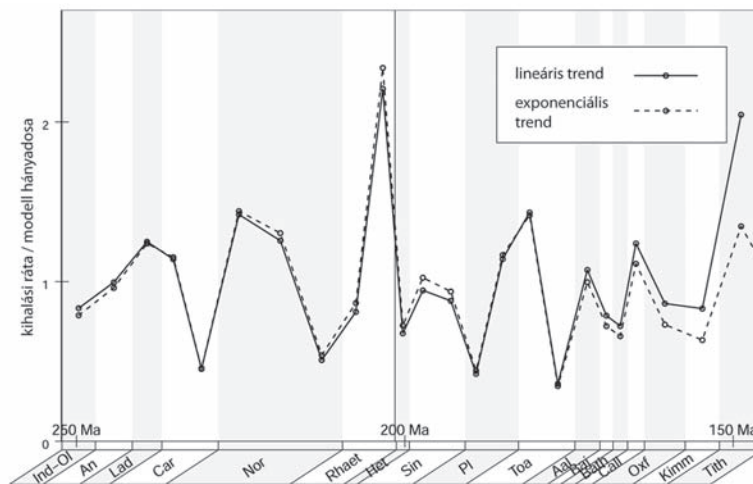
2. ábra: A triász-jura határt definiáló „aranyzóg” felavatása Kuhjoch (Tirol, Ausztria) globális sztratotípus (GSSP) szelvényében” 2011-ben. Jobbról balra Nicol Morton, a Nemzetközi Jura Rétegtani Albizottság korábbi elnöke, Axel von Hillebrandt, a GSSP-javaslat vezető szerzője, Stan Finney, a Nemzetközi Rétegtani Bizottság elnöke és a szerző, a Nemzetközi Jura Rétegtani Albizottság akkori elnöke

találunk, amelynek az ammoniteszei jelentősen eltérnek az Európából ismertektől. Megtaláljuk a *Choristoceras marsbit*, amely az Alpokban is a legfelső triász fontos indexfossziliája, megtaláljuk a *Psiloceras calliphyllum*ot, amely az alpi alsó jurában is gyakori, de közben találunk egy olyan szintet, ahol együtt fordul elő egy új, endemikus, azaz csak innen ismert *Psiloceras* faj, és egy másik endemikus faj a *Choristoceras* nemzetségből, amelyet szintén csak innen ismerünk.¹² Ennek a kettőnek úgy mond nem lenne szabad együtt előfordulnia, hiszen a *Choristoceras*ról eddig azt mondtuk, hogy az triász, a *Psiloceras* pedig jura korú. Világosan mutatja ez, hogy az ammoniteszek alapján megvont határ kérdéseket, korrelációs problémákat vet fel.

A triász végi kihalás

Mi lehet az oka annak, hogy az ammoniteszek, amelyek amúgy oly kiváló indexfossziliái a mezozoikumnak, pont a triász-jura határon kevésbé megbízhatóak a rétegtani korreláció számára? A magyarázat abban rejlik, hogy a triász végén következett be a földtörténet nagy kihalási eseményeinek egyike. A biodiverzitás történetét és azon belül a nagy kihalásokat legjobban globális őslénytani adatbázisok alapján tudjuk tanulmányozni. Legújabbban és mindaddig leghitelesebben a nemzetközi paleontológus közösség által fejlesztett Paleobiológiai Adatbázis elemzésével vizsgálható az élővilág sokféleségének alakulása a fanerozoikum során.^{13,14} A mindenkori diverzitást a fajok eredési és kihalási rátája határozza meg. A kihalási rátát leíró görbe igen változékony lefutású, jelentős csúcsokat mutat. A legnagyobb csúcs, azaz a legnagyobb fanerozoikum-i kihalás a perm végi esemény, de a többi számottevő kiugrás egyikét a triász-jura határon találjuk. A triász vége tehát az öt nagy, elsődleges kihalási esemény egyike a bioszféra történetében. Az ammoniteszek az esemény által leginkább érintett csoportok egyikébe tartoztak. Diverzitásuk a triász folyamán a perm végi nagy kihalást követő talpraállás után elért szintről folyamatosan csökkent. Ha tehát a triász-jura határt ammoniteszek alapján akarjuk kijelölni, akkor abba a problémába ütközünk, hogy egy nagyon megiritkult csoportot kívánunk felhasználni a korrelációra. Jogos a kérdés, hogy lett volna-e ennek a megoldásnak alternatívája. A tengeri planktonszervezetek közé tartozó radioláriák sokkal nagyobb gyakoriságban fordulnak elő, és nagyon markáns faunaváltást mutatnak a triász-jura határon. Alaposan feldolgozott legfiatalabb triász és legidősebb jura radioláriaegyütteseket Kanada csendes-óceáni partvidékén a Queen Charlotte-szigetekről (mára hivatalossá vált indián nevén Haida Gwaiiról) ismerünk, illetve a Panthalassa szuperóceán túlsó felén, a mai Japánban feltárt tengeri rétegsorokban is szinte ugyanazokat a fajokat találták meg. Az éles határ egyben kiváló korrelációs lehetőséget nyújt a radioláriafaunák alapján.¹⁵

Itthon Kocsis Ádám tanítványommal arra vállalkoztunk, hogy a radiolária-eseményt a globális adatbázis alapján vizsgáljuk meg. Most tehát nem az élővilág egészét, hanem annak egy kis szeletét, a radioláriák diverzitástörténetét elemezzük. Az ilyen elemzések módszertana rohamosan fejlődik, az általunk használt metrikát egy még nyomdában lévő tanulmány ismerteti.¹⁴ Emellett a saját újításunk abban áll, hogy az adatbázist a szokásos korszakszintű időbeli felbontás helyett finomabb, alkorszakfelbontással vizsgáltuk, a nóri korszakot három, a rhaetit pedig két részre bontva. A triász végi esemény, amely korábban nem látszott szignifikáns eseménynek a globális radioláriaadatokból,¹⁶ nagy felbontásban egyértelműen jelentkezik, azt igazolva, hogy a triász legvégén a radioláriák is nagy kihalást szenvedtek el¹⁷ (3. ábra). Ezek a kovavázú egysejtűek olyan ősmaradványcsoportot képviselnek, amely globálisan és egyes szelvényekben egyaránt nagyon markáns változást mutat. A kihalásuk fontos esemény az élővilág történetében, emellett jó rétegtani korrelációs lehetőséget is ad.



3. ábra. A radioláriák kihalási rátája és a modellezett lineáris, illetve exponenciális trend hányadosa a triász és jura során.¹⁷ A kihalási ráta számítása a közelmúltban bevezetett hézagkitöltő algoritmus alkalmazásával történt.¹⁴ Szembeötlő a rhaeti korszak, tehát a triász időszak végén jelentkező csúcs

Tanulságos más csoportok történetét is vizsgálni a triász-jura határon. A meleg égövi, sekélytengeri zátonyok nagy földtani és földtörténeti jelentőségű, izgalmas életteret alkotnak. A zátonylakó szervezetek és ezek közösségei nagyon érzékenyek a mindenkori környezetváltozásokra. A fanerozoikum során a zátonyépítő szervezetek diverzitástörténete rendkívül volatilis, nagy felívelések és mély hullámvölgyek jellemzik. A legsúlyosabb mélypontot a perm végi kihalás krízise jelenti, de nem sokkal marad el tőle a zátonyok triász végi összeomlása. Tirolban, az Északi-Mészkőalpok egy lenyűgöző szépségű hegyén, a Steinplattén ez az esemény valóságos tájképként vehető szemügyre. A felső triász fosszilis zátonytestének a teteje rögzíti azt a változást, amely ellehetetlenítette a zátony továbbépülését. A triász-jura határ eseményeit a 2000-es évek elején egy ötéves nemzetközi kutatási program, az IGCP 458 projekt vizsgálta.¹⁸ Ennek társvezetőjeként, a projekt záró terepi konferenciáján látogattam el a Steinplattéra, hogy kutatótársaimmal együtt próbáljuk jobban megérteni a tengeri környezet és a zátonyok élővilágának egyidejű krízisét.

Ahhoz, hogy a triász végi eseményeket igazán globális hatásúnak tekinthessük, a szárazföldi élővilág fejlődéstörténetét is ismernünk kell. Szárazföldi üledékes rétegsorokból viszonylag nehezebb nagy felbontású, pontosan korolt adatsorokat nyerni. A leggazdagabb ilyen korú ősnövénylelőhely Kelet-Grönlandon van, ahol kimutatták, hogy a triász időszaki vegetációt a jura elejétől jelentősen különböző társulás váltja fel, tehát a szárazföldi növényvilágban is kicserélődés tapasztalható.¹⁹

A szárazföldi állatvilágot vizsgálva közismert, hogy a mezozoikumot a hüllők korának tartják, joggal gondolhatunk mindenki kedvenc őszállataira, a dinoszauruszokra. A laikusok, sőt az iskolás gyerekek körében is ki ne tudná, hogy a dinoszauruszok a kréta végén kihaltak. De mikor jelentek meg? A triászban. Mikor lettek dominánsak? A jura során. A hüllők történetében a triász és a jura határa rendkívül fontos fordulópont, amely a dinoszauruszfé-

lék felívelését hozta magával egy másik hullőcsoport, a Crurotarsi rovására.^{20,21} Ez a csoport a triász végén jelentős mértékű kihalást szenvedett, megnyitva ezzel az utat a dinoszauruszok térhódítása előtt.

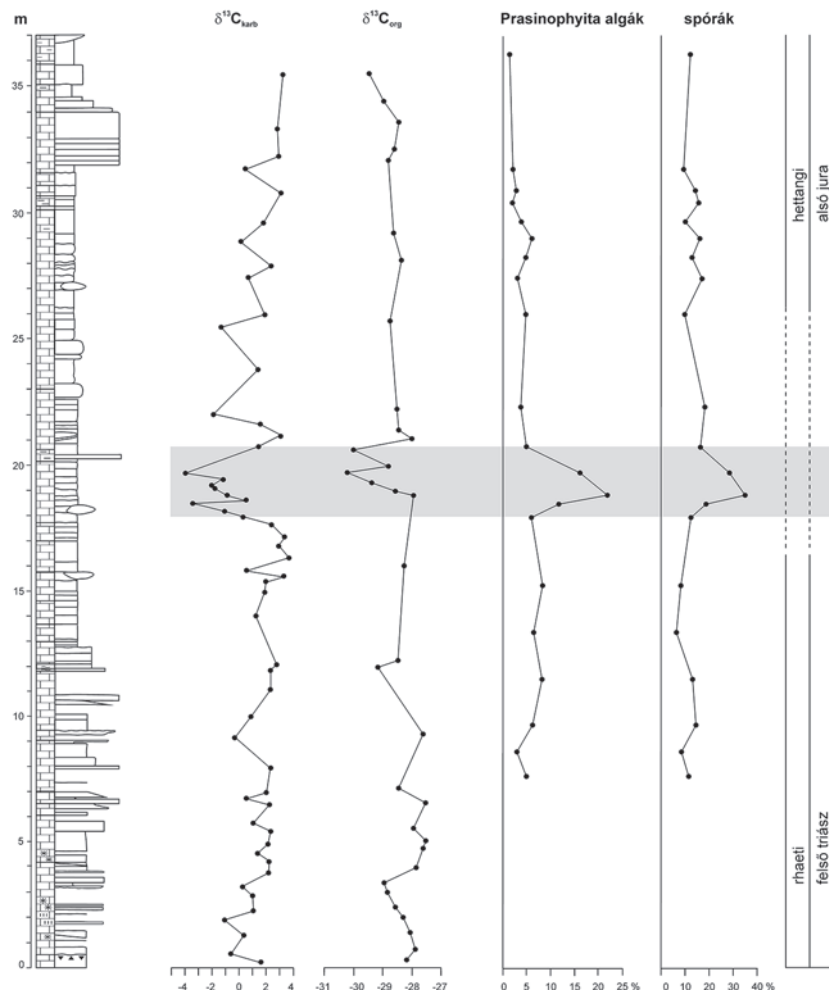
Triász végi környezetváltozás

Az ősmaradványokból megismert triász végi kicserélődést vizsgálva felmerül a kérdés, mi adhat minderre magyarázatot, milyen okok állhattak az élővilágot érintő változások mögött. Az ökológusok mai példák sokaságával mutatják be az élővilág reakcióját a környezetváltozásokra, amelyeknek egyik nagyon érzékeny tükre a szénkörforgás mindenkori alakulása a Földön. A szén körforgásának alakulását pedig stabilizotóp-geokémiai módszerekkel, a szén könnyű, 12-es tömegszámú és a nehéz, 13-as tömegszámú izotópjának arányát mérve geológiai minták alapján is tudjuk vizsgálni.

Már a múlt évezred utolsó évtizedeiben világossá vált, hogy a földtörténet nagy kihalásaihoz rendre szénizotóp-anomáliák kapcsolódnak. A triász-jura határ volt az utolsó ezeknek a sorában, ahonnan sokáig nem sikerült ilyen anomáliát kimutatni. Magyarországon a csővári szelvényben kollegáimmal, Demény Attila akadémikustársammal és több más szerzőtársammal együtt, világszerte az elsők között sikerült kimutatnunk a triász-jura határon is egy markáns negatív szénizotóp-anomáliát.⁸ Velünk szinte egy időben ugyanerre az eredményre jutott egy amerikai–kanadai kutatócsoport Kanadában, a Queen Charlotte-szigetek egyik szelvényében,²² egy brit kutatócsoport pedig Délkelet-Anglia egy tengerparti feltárásában.²³ Az azóta eltelt bő egy évtizedben közölt eredmények alapján mára sokkal részletesebben ismerjük már az izotópos fejlődéstörténetet, többek között Kuhjochból, az „aranyzóges” GSSP-szelvényből is nagyon megbízható szénizotópgörbe áll rendelkezésünkre.²⁴ Itt definiálták az időszakok határát a *Psiloceras* első megjelenése alapján, de az igazán fontos földtörténeti eseményt a kuhjochi szelvényben is a szénizotópgörbe markáns negatív anomáliája jelzi. Ez egybeesik az élővilágban az ősmaradványrekord alapján

tapasztalható kihalással is, és véleményem szerint indokolt lett volna a határt kemosztratigráfiai alapon, a szénizotóp-anomália szintjében rögzíteni, ez jobban összehangolta volna a földtörténeti eseményeket a földtörténeti időskálával.

Akik az ilyen definíció ellen érveltek, azok azt is fölhasználták ellenérvként, hogy a szénizotóp-anomáliák értelmezése nem mentes az ellentmondásoktól. Mára tagadhatatlan ugyan a markáns negatív szénizotóp-anomália léte, de nem ez az egyetlen kilengés a vizsgált késő triász és kora jura intervalumában. Azóta egy előfutár-anomáliát, azaz egy kisebb negatív kilengést is kimutattak a rhaeti emeletbeli képződményekben,²⁵ és a hettangiból ismert egy pozitív anomália nem sokkal a határt jelző rövid kezdeti és hosszabb fő negatív anomália fölött.²⁶ Úgy tűnik tehát, hogy a környezetváltozás nemcsak egy markáns eseményre korlátozódik, amely a negatív szénizotóp-anomáliában érhető tetten, hanem egy eseményláncolatot alkot. Ennek a jelentősége abban áll, hogy a Föld szénkörforgásának a geokémiai módszerekkel igazolható változása egybeesett az élővilág változásaival. Ezt a megállapítást Csőváron is ellenőrizni tudtuk. A negatív szénizotóp-anomália pontos rétegtani szintjét a karbonátba beépült és a szerves anyagban megőrződött szén elemzésével egyaránt dokumentálni tudtuk,⁹ és összevetettük a palinomorfák különböző csoportjainak gyakorisági eloszlásával (a palinomorfa gyűjtőnéven a szárazföldi spórákat, a polleneket és a tengeri szerves vázú plankton maradványait értjük). A spórák gyakorisági csúcsa a triász-jura határra esik, és ez azért érdekes, mert a spórát hordozó növények a szárazföldi vegetációban gyakran ökológiai stresszre utalnak, a megzavart és a zavar után újjáépülő pionír közösségek első képviselői lehetnek. Ezzel egyidejű csúcsot mutatnak a Prasinophyta algák, amelyek hasonló stresszindikátorok a tengeri környezetben. A környezeti krízisre reagáló opportunisták csoportok hirtelen felvirágzását és a tengeri és a szárazföldi növényvilág krízisének, valamint a szénkörforgás drasztikus változásának az időbeli egybeesését mutattuk ki²⁷ (4. ábra).



4. ábra. Egyidejű szénizotóp-anomália (karbonát- és szervesanyag-mérési eredményekből)⁸ és a szárazföldi spórák és tengeri Prasinophyta algák gyakorisági csúcsa²⁷ a csővári triász-jura határszélvényben

A szénizotóparány vizsgálatánál szem előtt kell tartani, hogy akár tengeri mészvázú élőlények által kiválasztott karbonátba, akár tengeri szervesanyagba épül be a szén, az a tengervízzel izotópos egyensúlyt tartva válik ki, a tenger-víz pedig egyensúlyban áll az atmoszférával, ahol legnagyobb mennyiségben a szén-dioxid tartalmazza a szenet. A fenti összefüggések miatt fontos számunkra a légköri szén-dioxid koncentrációjának alakulása, történetének a rekonstrukciója. Ugyanazok a kutatók, akik Grönlandon a késő triász és kora jura növénymaradványokat vizsgálták, a növények levelein található gázcserenyílások sűrűségén alapuló módszerrel becsülték meg a légköri szén-dioxid egykori koncentrációját.²⁸ A módszer azon alapul, hogy minél nagyobb a CO₂ koncentrációja, annál kevesebb gázcserenyílásra van szüksége a növénynek a respirációhoz. Létezik egy olyan, élő kövületnek tekintett növénycsoport, a *Gingko*-félék, amelyek mai képviselőjét, a *Gingko bilobát* fel lehet használni annak kalibrálására, hogy adott CO₂-változás milyen sztómasűrűség-változást eredményez. Ezt a kalibrációt megfordítva felhasználták a triász-jura határon átívelő elterjedésű *Gingkok* sztómasűrűségéből az egykori CO₂ változását leíró görbe megszerkesztésére, amely markáns CO₂-emelkedést mutat a triász-jura határon.²⁹ Mivel a szén-dioxid üvegházhatású gáz, ebből az eredményből nagy mértékű globális felmelegedés valószínűsíthető. Az adatok és a modellszámítások szórása jelentős, de az eredmények 500 ppm-től akár 2000 ppm-et is meghaladó CO₂-koncentrációra utalnak, ezt pedig talán nem túlzás „szuperüvegház” Földnek nevezni.

A következőkben kövessük nyomon a légköri CO₂ sorsát. Az atmoszféra érintkezik és kapcsolatban áll a hidroszférával, azaz a levegőben lévő CO₂-keveredés útján az óceán felső vízrétegébe kerül, majd eljut az óceán mélyebb rétegeibe is. A CO₂ a vízben oldódva az óceán savasodását, pH-jának csökkenését idézi elő. Az óceán savasodása pedig nagyon komoly kihívást jelent a karbonátkiválasztó szervezetek számára. A szén-dioxid szintjének növekedése hozzájárulhatott a mészvázú élőlényeknek az ősmaradványrekordban is tapaszt-

talható, a triász végi kihalásban megnyilvánuló kríziséhez. Ehhez kapcsolódó krízis ráadásul a rétegtani rekordban is megfigyelhető. Karbonátos rétegsorokban sok helyütt észlelték, hogy a karbonátos egységek közé sziliciklasztos, törmelékes üledékes kőzetrétegek illeszkednek, illetve hiátus, üledékhézag jelentkezik. Ismerünk ugyan néhány, viszonylag folyamatos üledékképződéssel jellemezhető szelvényt a világon, például Csővár és Kuhjoch szelvényei is ezek közé tartoznak, de bőven találunk példát üledékhézagos karbonátsorozatokra is. Ilyen a Bakonyban a kőrös-hegyi szelvény. Itt a terepi feltárásban nem látványos, de mégis számottevő eltérés van a felső triász Dachsteini Mészke Formáció Megalodontidae kagylókkal teli rétegei és a legalsó jurába tartozó Kardosréti Mészke Formáció ilyen ősmaradványokat nem tartalmazó rétegei között. Akár polírozott felületi csiszolatot, akár vékonycsiszolatokat nézve a két formáció határa nagyon éles, utóbbiakban szembeötlő a Dachsteini Mészke mészkőanyagát adó mészkiválasztó algáknak az eltűnése, továbbá a nagyon robusztus mészkő elválasztó *Triasina* foraminiferák eltűnése a határon. Mindez jól beleillik abba a képbe, amelyet a vastag héjú Megalodontidae kagylók fejlődéstörténete is alátámaszt, miszerint a savasodás a triász-jura határon a mészkiválasztó szervezetek kríziséhez vezetett.^{30,31} Hasonló üledékhézagos karbonátos rétegsort ismerünk a tatai Kálvária-dombon, a Dunántúli-középhegység mezozoikumának klasszikus lelőhelyén, a ma természetvédelmi oltalom alatt álló és az ELTE által kezelt geológiai bemutatóhelyen.³²

A triász-jura határ kora

Az élővilág történetének és a bizonyíthatóan azzal összefüggésben álló környezetváltozásoknak az áttekintése után érdemes összefoglalni a triász-jura határ koráról rendelkezésre álló ismereteket. A rétegtani határok korának számszerűsítése nem öncélú, mert lehetőséget teremt a csak radioizotópos módszerekkel korolható képződmények rétegtani besorolására és korrelációjára, ezáltal fontos földtörténeti összefüggések felismerésére.

Ebben a témában már PhD-hallgató koromban végeztem kutatásokat, doktori munkám a jura időszaki időskála kalibrációjáról szól.³ Ennek kapcsán fontos volt a triász-jura határ számszerű korát is pontosítani, ezt U-Pb kormeghatározással értük el. A Queen Charlotte-szigetekhez tartozó Kungaszigeten található az a szelvény, amelyből a 90-es évek végén rendelkezésre álló módszerek és műszerek segítségével $199,6 \pm 0,4$ millió éves kort határoztunk meg, amelyet akkor pontosnak és megbízhatónak tartottunk.³³ Egy vulkáni tufabetelepülés cirkonjain mértük ezt a kort, abból a szelvényből, amelyben a radioláriafaunának nagyon éles váltást mutatnak a triász-jura határon. A tufaréteg közvetlenül a határ alatt húzódik, így gyakorlatilag megadja a határ korát. A geológiai időskálával foglalkozó könyv 2004-es kiadásában az általunk meghatározott kort fogadták el a triász-jura határ korának.³⁴ A tudomány azonban halad; az általunk is használt elven tengeri, ammonitesz-biosztratigráfiával jól korolt, üledékes rétegsorokba települő tufák cirkon U-Pb kormeghatározásának a módszerével mások máshonnan, Peruból és Nevadából új koradatokat határoztak meg és közöltek. Ezek az új koradatok kissé idősebbek, 201,3 és 201,4 Ma közöttiek.^{35,36}

Mindeközben mi is elővettük a régi mintáinkat, és megnéztük, vajon maradt-e bennük annyi cirkon, amelyet újra lehetne elemezni. Szerencsére találtunk, hiszen időközben a technika annyit fejlődött, hogy ma már egyetlen cirkonzemcse is elég ahhoz, hogy kort határozzunk belőle, és ez $201,7 \pm 0,6$ Ma-nak adódott.³⁷ Tehát 1,5–2 millió évet „idősödött” a határ kora, annak köszönhetően, hogy az U-Pb kormeghatározás komoly módszertani fejlődésen ment keresztül az elmúlt évtizedben.

A kor pontosítása mellett kritikusan fontos a triász-jura határon lezajlott események időtartamának, azaz annak meghatározása, hogy mennyire rövid a szénizotóp-kilengéssel, illetve az ősmaradványrekordban kimutatott kihálással jellemzett intervallum. Ugyanabból a dél-angliai szelvényből, ahonnan

az elsők között ismertették a negatív szénizotóp-anomáliákat, az üledékes rétegsor ciklusstratigráfiai elemzésével az izotópos csúcsot egy vagy legfeljebb két precessziós ciklusba tartozónak írták le, azaz a szénkörforgás felborulása 20 vagy 40 ezer éven belül zajlott le.³⁸

A Közép-atlanti magmás provincia

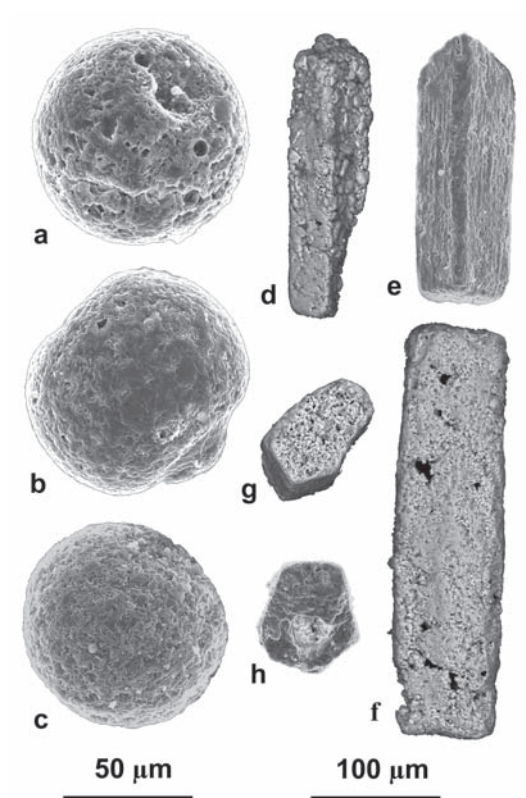
A fentiekben bemutatott sokrétű bizonyítékok segítségével sikerült igazolni az élővilág válságát és bemutatni az egyidejű környezetváltozás különböző aspektusait. Egyre pontosabban meg tudjuk határozni ezeknek az eseményeknek a korát, de még nem esett szó a mozgatórugóról, az események kiváltó okairól.

A triász végén a Föld arculata a maitól gyökeresen eltérő volt, az ősföldrajzi képet a Pangea szuperkontinense uralta. Az elmúlt 200 millió év lemeztectonikai folyamatai a Pangea feldarabolódásához vezettek, amelyet a Közép-atlanti magmás provincia (KAMP) vulkanizmusához kapcsolható riftesedés indított el. A KAMP hatalmas kiterjedésű vulkáni területe Pangea közepét érintette (*i. ábra*), a riftesedés pedig a mai Atlanti-óceán legősibb, középső medencéjének kinyílásához vezetett. A vulkanizmus korát radioizotópos kormeghatározások alapján egyre pontosabban és megbízhatóbban ismerjük. Az ⁴⁰Ar/³⁹Ar és az U-Pb módszer fejlődésével a vulkanitok koreloszlásáról egyre nagyobb biztonsággal mutatható ki, hogy legnagyobb részük a 200–202 Ma intervallumba esik. A KAMP becsült területe 2 millió km², a felszínre ömlő láva térfogata elérhette a 2,5 millió km³-t, ezzel ez a fanerozoikum egyik legnagyobb kontinentális árbazalt provinciája. Indokolt tehát megvizsgálni, hogy ez a vulkáni esemény milyen változásokat idézett elő a környezetben, a vulkáni kigázosodás révén elsősorban az atmoszféra összetételében, és ennek következményei milyen eseményláncolatot alkottak. Az összefüggések meg-alapozásának kritikus pontja az időbeli egyezés igazolása. A legújabb ⁴⁰Ar/³⁹Ar kormeghatározások Észak-Amerika mai keleti partvidékéről, a riftesedés által létrejött Newark- és Fundy-medence és más medencék területéről, illetve

az Atlanti-óceán túloldaláról, a marokkói Magas-Atlaszból azt mutatják, hogy a legidősebb, rétegtanilag legalsó bazaltos kiömlési egységek mind 201–202 Ma közötti korúak, és a közvetlenül alattuk lévő üledékek olyan palinomorfákat tartalmaznak, amelyek jól jelzik a triász időszak legvégét.

A kormeghatározásban az elmúlt években a leglátványosabb fejlődést az U-Pb geokronológia produkálta. Ma a nemzetközi élvonalba tartozó laboratóriumokban új fejlesztésű előkészítő módszerek alkalmazása után, egykristályok elemzésével olyan pontosságú mérési eredmények születnek, amelyek alapján már a harmadik tizedesjegyet is ki merik mondani a kutatók, azaz ezeréves szintű felbontást sikerül elérni. A legfrissebb adatok szerint a legidősebb, a KAMP-hoz sorolható bazaltok kora $201,564 \pm 0,22$ Ma.³⁹

Hazánkban sajnos még nincs U-Pb kormeghatározásra berendezkedett laboratórium, de más szempontból közelítve ismét sikerült hozzájárulni a vulkanizmus és a kihálás egyidejűségének a problémájához. Azt a kérdést tettük fel, hogy vajon ki lehet-e mutatni a KAMP tevékenységének közvetlen nyomait tengeri rétegsorokban. Ausztriában, az Északi-Mészköalpokból ismerjük a triász-jura határ körül Eiberg-medencének nevezett egykori üledékgyűjtőben lerakódott, jól feltárt rétegsorokat. Ide tartozik a kuhjochi GSSP-szelvénye is, csakúgy mint a medence keleti részén Kendlbachgraben klasszikus, már a 19. században sokat tanulmányozott triász-jura határszelvénye. A rétegsor nagyon hasonló a Kuhjochban megismerthez, a határmárga alatt a kösseni mészkőformáció található. Ennek legfelső rétegeiből Zajzon Norbert mikromineralógiai vizsgálatai vulkáni eredetű mafikus ásványszemcsék, piroxén átalakulása utáni pszeudomorfózákat mutattak ki, amelyek olyan koaptatlanok, hogy nem kerülhettek vízi szállítódás útján az üledékgyűjtőbe, hanem nagy valószínűséggel a légkörből kiülepedő vulkáni hamuból származnak (5. ábra).⁴⁰ Hasonlóképp vulkáni eredetűnek tartott szemcséket szferulák formájában is sikerült kimutatni, ezeknek az átalakulási terméke pedig egy



5. ábra. Vulkanai eredetű ásványszemcsék pásztázó elektronmikroszkópos képei a Kösseni Mészke Formáció legfelső, közvetlenül a triász-jura határ alatti rétegeiből, Kendlbachgraben (Ausztria) határszelvényéből⁴⁰

jellegzetes agyagásvány, a vermikulit.⁴¹ Ugyanezek a rétegek, a Kösseni Formáció legfelső rétegei, amelyekben a késő triász fauna (pl. a *Misikella* konodonta és a *Choristoceras* ammonitesz nemzetség) kihalása rögzíthető, és amelyekben a kezdeti negatív szénizotópcsúcs jelentkezik, nyomelem-geokémiai szempontból is anomáliát mutatnak. A ritkaföldfémek családjának nagyobb atomtömegű tagjai dúsulnak, és ez markásan eltér minden más, a nyomelemeloszlás szem-

pontjából vizsgált rétegtől. Ez a dúsulás szintén KAMP-eredetű anyag jelenlétére utalhat.⁴⁰ Tehát ezek a rétegek több szempontból különlegesek, és azt is rögzítik, hogy a kihalással és a szénkörforgás zavarával egyidőben vulkáni anyag került közvetlenül a tengeri üledékgyűjtő medencébe.

Összegzés

A triász végénél sokkal többet vizsgált perm végi esemény bonyolult összefüggésrendszerét többek között Wignall értelmezte úgy, hogy a változások elsődleges kiváltó oka egy nagy magmás provincia (abban az esetben a Szibériai trap) vulkanizmusa volt.⁴² Ezt a modellt jól lehet adaptálni a triász végi eseménysorra is. A fentiekben ismertetett adatok alátámasztják, hogy a KAMP vulkanizmusa indította el a környezetváltozások bonyolult láncolatát.^{5,43} A Föld rendszerként működik, a köpenyeredetű magmatizmusnak a litoszférában lejátszódó folyamatai a többi alrendszer mindegyikében (az atmoszférában, a hidroszférában és a bioszférában) is változásokat idéztek elő. A rendszerszintű változások legfontosabb közvetítője a vulkáni kigázosodásból a légkörbe kerülő, éghajlatmódosító hatású gázok. A kén-dioxid rövid távú lehűlést okoz, ennek kimutatása különösen nehéz a földtörténeti régmúltban. A halogénekkal együtt savas esőt is okozhatnak, a CO₂ pedig hosszabb távú globális felmelegedést idéz elő. Ettől környezetváltozások láncolata indult el az óceánban is, a légkör globális felmelegedésétől az óceán vize is felmelegedett, és mindez fel erősödött a pozitív visszacsatolási hurokként ható gáz-hidrát disszociáció által. Ez a folyamat a mélyóceáni üledékben csapdázódott klatrátokból metán felszabadulásával jár, amely a szén-dioxidnál sokkal hatékonyabb üvegházgáz. Ez lehetett az oka annak, hogy a vulkanizmus által kiváltott globális felmelegedés szuperüvegház-állapotba torkollott. A tengeri élővilágot, különösen a mészvázú élőlényeket, hatványozottan sújtotta az óceánok savasodása is. Ezekre a környezetváltozásokra a bioszféra válaszreakciója a tömeges kihalás, a tengerben és a szárazföldön egyaránt.

A címben beharangozott 200 millió éves történet kifejtését a fentiekben tudományos alaposággal kíséreltem meg. Ennek üzenete azonban nem csak a szűk szakmai közönség számára lehet fontos. Sok az áthallás a Földön ma zajló folyamatok irányába: jelenleg az élővilágban a hatodik nagy kihalásnak vagyunk tanúi,⁴⁴ a globális felmelegedés ténye tudományosan sokrétűen igazolt,⁴⁵ az óceánok savasodása pedig aggasztó mértékű.⁴⁶ Befejezésül ezért a tágabb közönség számára megpróbálom az ötvenperces előadást mintegy ötven szóba sűrítve, rövid sajtóhír stílusában is megfogalmazni:

A bioszféra legnagyobb válságainak egyike a triász időszak végén következett be, egy időben a Közép-atlanti magmás provincia nagy kiterjedésű vulkáni tevékenységével. A szárazföldi és tengeri élővilág tömeges kihalását a vulkanizmus által kiváltott éghajlatváltozás és gyors környezetváltozások láncolata okozhatta mintegy 201 millió évvel ezelőtt. Az esemény lefolyásának megismeréséhez magyar kutatók eredményei is hozzájárultak. Számos nyugtalanító párhuzam vonható a természet triász végi krízise és a környezetünket ma sújtó, ember okozta változások között.

Epilógus

Az ELTE Földtani Tanszékén oktatta és kutatva nagy elődök örökségét vihetem tovább. Közöttük van a magyar geológia egyik legnagyobb hatású alakja, Vadász Elemér, akinek a földtani megismerés módjára vonatkozó tanítása, az „anyag, alak, folyamat” egymásra épülő háromsága geológusok egymást követő nemzedékei képzésének vált alappillérvé. A vadászi gondolat eredeti megfogalmazása így szól: „A földtani vizsgálódás során a közvetlen megfigyelés tárgyává tehető földkéreg anyagi és alakú sajátjaiból, mint régi működések eredményéből, termékeiből következtetünk magára a működésre, annak nemére, mértékére és folyamatára.”⁴⁷ Több mint nyolcvan év múltán sem veszítette érvényét Vadász tanítása, de a 21. század elején érdemes és indokolt egy kiegészítést tenni hozzá. A triász-jura határ eseményeinek oknyomozásából is leszűrhetjük, hogy

az anyag és alak vizsgálata mellett, a korszerű és kifinomult tudományos módszerekkel gyűjtött és elemzett adatok ma már nélkülözhetetlenül járulnak hozzá a földtani folyamatok értelmezéséhez. A geokronológia segítségével kapott koradatok, az anyagvizsgálat új dimenzióit jelentő geokémiai adatok (pl. izotóparányok, nyomelemek gyakorisága) és az őslénytani vizsgálatokból összegzett globális térbeli és időbeli elterjedési adatok mind alapvető újdonságot hoztak a triász végi események, folyamatok feltárásához és megértéséhez. 2013-ban tehát Vadász tanítását továbbgondolva így összegezhettük a földtani, földtörténeti kutatások lényegét: *anyag + alak + adat* → *folyamat*. Ezzel a kiegészítéssel ismerhetjük el az adatgyűjtés és adatelemzés, a korszerű műszerekkel mért és számítógép segítségével, statisztikai módszerekkel elemzett adatok jelentőségét a mindinkább kvantitatív tudománnyá váló, modern földtanban.

Záró gondolatom ihletője egyetemünk, az ELTE Rektori Hivatalának udvarán álló, Vergiliust és Dantét ábrázoló szobor. Talapzatán ez a felirat olvasható: „*Lux e praeterito lucens futura illuminat tempora*” (magyar fordításban: „A múltból jön a fény, amely a jövőt világítja meg”). Úgy vélem, a Dantétól származó idézet bölcsessége nem csak az emberi történelemre lehet érvényes. A székfoglaló előadásban a földtörténet múltjából csaltam elő fényeket, a bemutatott 200 millió évvel ezelőtti események tanulságai pedig az emberiséget körülvevő természeti környezet jövőjének megvilágítására is alkalmasak lehetnek. Ezért tartom ma minden korábbinál fontosabbnak a földtörténet kutatását, és ezért örülök, hogy ezeket a kutatásokat kollégáimmal, tanítványaimmal immár a Magyar Tudományos Akadémia levelező tagjaként folytathatom.

Köszönetnyilvánítás

E rövid felsorolásban a teljesség igény nélkül, de hálásan mondok köszönetet mindazoknak, akik az elmúlt évtizedekben segítettek pályafutásomat, akiknek a támogatásával lehetővé vált eljutnom a Magyar Tudományos Akadémia tagságáig. Különösen fontos szerepe volt ebben néhány tanáromnak és men-

toromnak, Géczy Barnabásnak és Vörös Attilának, akiknek most akadémikustársa lehetek, Galács Andrásnak, Paul Smith-nek és Jim Mortensennek. Számos munkatársammal és az eddigi pályám során összesen több mint száz szerzőtársammal együtt végeztük az itt bemutatott kutatásokat is, és közösen formáltuk az eredmények értelmezését. Az utóbbi években tanítványaimnak és hallgatóimnak köszönhetem az inspirációt a munka folytatására és az ismeretek továbbadására. Családom kitartó támogatása és szerető türelme nélkül tudományos eredményeim töredékét sem érhettem volna el, köszönet illeti feleségemet, Mayer Máriát és gyermekeimet, Mártont, Mátét, Lillát és Áront. A kutatások anyagi forrását többek között az OTKA To42802 és K72633 projektjei biztosították. Az előadás szerkesztett változatának elkészítésében Bosnakoff Mariann nyújtott segítséget. Ez a munka az MTA–MTM–ELTE Paleontológiai Kutatócsoport 197. közleménye.

Hivatkozott irodalom

- 1 Pálfy J. (1986): Balaton-felvidéki középső-triász brachiopoda faunák vizsgálata (Investigations on Middle Triassic brachiopod faunas from the Balaton Highland (Transdanubian Central Range, Hungary). *Őslénytani Viték (Discussiones Palaeontologicae)* 33: 3–52.
- 2 Pálfy, J. (1991): *Uppermost Hettangian to lowermost Pliensbachian (Lower Jurassic) biostratigraphy and ammonoid fauna of the Queen Charlotte Islands, British Columbia*. MSc-disszertáció, University of British Columbia, <http://hdl.handle.net/2429/30266>.
- 3 Pálfy, J. (1997): *Calibration of the Jurassic time scale*. PhD-disszertáció, University of British Columbia, <http://hdl.handle.net/2429/7429>.
- 4 Ruiz-Martínez, V. C., Torsvik, T. H., van Hinsbergen, D. J. & Gaina, C. (2012): Earth at 200Ma: Global palaeogeography refined from CAMP palaeomagnetic data. *Earth and Planetary Science Letters* 331: 67–79.
- 5 Pálfy, J. & Kocsis, T. Á. (2014): Volcanism of the Central Atlantic Magmatic Province as the trigger of environmental and biotic changes around the Triassic-Jurassic boundary. In: G. Keller & A. C. Kerr (eds.): *Volcanism, Impacts and Mass Extinctions: Causes and Effects*. Geological Society of America Special Paper Vol. 505, 245–261.
- 6 Pálfy, J., Barbacka, M., Császár, G., Demény, A., Görög, Á., Haas, J., Götz, A., Oravecz-Scheffer, A., Ozsvárt, P. & Piros, O. (2006): The Triassic/Jurassic boundary in three contrasting facies in Hungary. *Volumina Jurassica* 4: 292–293.
- 7 Ruckwied, K., Götz, A. E., Pálfy, J. & Török, Á. (2008): Palynology of a terrestrial coal-bearing series across the Triassic/Jurassic boundary (Mecsek Mts., Hungary). *Central European Geology* 51: 1–15.
- 8 Pálfy, J., Demény, A., Haas, J., Hetényi, M., Orchard, M. & Vető, I. (2001): Carbon isotope anomaly and other geochemical changes at the Triassic-Jurassic boundary from a marine section in Hungary. *Geology* 29: 1047–1050.
- 9 Pálfy, J., Demény, A., Haas, J., Carter, E. S., Görög, Á., Halász, D., Oravecz-Scheffer, A., Hetényi, M., Márton, E., Orchard, M. J., Ozsvárt, P., Vető, I. & Zajzon, N. (2007): Triassic-Jurassic boundary events inferred from integrated stratigraphy of the Csóvár section, Hungary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 244: 11–33.
- 10 Pálfy, J. & Dosztály, L. (2000): A new marine Triassic-Jurassic boundary section in Hungary: preliminary results. In: R. L. Hall & P. L. Smith (eds.): *Advances in Jurassic Research 2000*. GeoResearch Forum Vol. 6, pp. 173–179.
- 11 Hillebrandt, A. v., Krystyn, L., Kürschner, W. M., Bonis, N. R., Ruhl, M., Richoz, S., Schobben, M. A. N., Urlichs, M., Bown, P. R., Kment, K., McRoberts, C. A., Simms, M. & Tomášových, A. (2013): The Global Stratotype Sections and Point (GSSP) for the base of the Jurassic System at Kuhjoch (Karwendel Mountains, Northern Calcareous Alps, Tyrol, Austria). *Episodes* 36: 162–198.

- 12 Yin, J., Smith, P. L., Pálffy, J. & Enay, R. (2007): Ammonoids and the Triassic-Jurassic
boundary in the Himalayas of southern Tibet. *Palaeontology* 50: 711–737.
- 13 Alroy, J., Aberhan, M., Bottjer, D. J., Foote, M., Fursich, F. T., Harries, P. J.,
Hendy, A. J., Holland, S. M., Ivany, L. C., Kiessling, W., Kosnik, M. A., Marshall, C. R.,
McGowan, A. J., Miller, A. I., Olszewski, T. D., Patzkowsky, M. E., Peters, S. E.,
Villier, L., Wagner, P. J., Bonuso, N., Borkow, P. S., Brenneis, B., Clapham, M. E.,
Fall, L. M., Ferguson, C. A., Hanson, V. L., Krug, A. Z., Layout, K. M., Leckey, E. H.,
Nurnberg, S., Powers, C. M., Sessa, J. A., Simpson, C., Tomasovych, A. & Visaggi, C. C.
(2008): Phanerozoic trends in the global diversity of marine invertebrates. *Science* 321:
97–100.
- 14 Alroy, J. (2014): Accurate and precise estimates of origination and extinction rates.
Paleobiology 40: 374–397.
- 15 Carter, E. S. & Hori, R. S. (2005): Global correlation of the radiolarian faunal change
across the Triassic-Jurassic boundary. *Canadian Journal of Earth Sciences* 42: 777–790.
- 16 Kiessling, W. & Danelian, T. (2011): Trajectories of Late Permian - Jurassic radiolarian
extinction rates: no evidence for an end-Triassic mass extinction. *Fossil Record* 14: 95–101.
- 17 Kocsis, T. Á., Kiessling, W. & Pálffy, J. (2014): Radiolarian biodiversity dynamics
through the Triassic and Jurassic: Implications for proximate causes of the end-Triassic
mass extinction. *Paleobiology* 40: 625–639.
- 18 Hesselbo, S. P., McRoberts, C. A. & Pálffy, J. (2007): Triassic–Jurassic boundary
events: Problems, progress, possibilities (Special Issue). *Palaeogeography, Palaeoclimatology,
Palaeoecology* 244: 1–423.
- 19 McElwain, J. C., Wagner, P. J. & Hesselbo, S. P. (2009): Fossil plant relative abundances
indicate sudden loss of Late Triassic biodiversity in East Greenland. *Science* 324: 1554–
1556.
- 20 Olsen, P. E., Kent, D. V., Sues, H.-D., Koeberl, C., Huber, H., Montanari, A.,
Rainforth, E. C., Fowell, S. J., Szajna, M. J. & Hartline, B. W. (2002): Ascent of dinosaurs
linked to an iridium anomaly at the Triassic-Jurassic boundary. *Science* 296: 1305–1307.
- 21 Brusatte, S. L., Benton, M. J., Ruta, M. & Lloyd, G. T. (2008): Superiority, competition,
and opportunism in the evolutionary radiation of dinosaurs. *Science* 321: 1485–1488.
- 22 Ward, P. D., Haggart, J. W., Carter, E. S., Wilbur, D., Tipper, H. W. & Evans, T.
(2001): Sudden productivity collapse associated with the Triassic-Jurassic boundary mass
extinction. *Science* 292: 1148–1151.
- 23 Hesselbo, S. P., Robinson, S. A., Surlyk, F. & Piasecki, S. (2002): Terrestrial and marine
mass extinction at the Triassic–Jurassic boundary synchronized with major carbon-cycle
perturbation: A link to initiation of massive volcanism? *Geology* 30: 251–254.
- 24 Ruhl, M., Bonis, N. R., Reichert, G. J., Damste, J. S. S. & Kurschner, W. M. (2011):
Atmospheric carbon injection linked to end-Triassic mass extinction. *Science* 333: 430–
434.

- 25 Ruhl, M. & Kürschner, W. M. (2011): Multiple phases of carbon cycle disturbance from
large igneous province formation at the Triassic-Jurassic transition. *Geology* 39: 431–434.
- 26 Williford, K. H., Ward, P. D., Garrison, G. H. & Buick, R. (2007): An extended organic
carbon-isotope record across the Triassic-Jurassic boundary in the Queen Charlotte
Islands, British Columbia, Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 244:
290–296.
- 27 Götz, A. E., Ruckwied, K., Pálffy, J. & Haas, J. (2009): Palynological evidence of
synchronous changes within the terrestrial and marine realm at the Triassic/Jurassic
boundary (Csővár section, Hungary). *Review of Palaeobotany and Palynology* 156: 401–409.
- 28 McElwain, J. C., Beerling, D. J. & Woodward, F. I. (1999): Fossil plants and global
warming at the Triassic-Jurassic Boundary. *Science* 285: 1386–1390.
- 29 Steinthorsdottir, M., Jeram, A. J. & McElwain, J. C. (2011): Extremely elevated CO₂
concentrations at the Triassic/Jurassic boundary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology,
Palaeoecology* 308: 418–432.
- 30 Hautmann, M., Benton, M. J. & Tomasovych, A. (2008): Catastrophic ocean acidification
at the Triassic-Jurassic boundary. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abhandlungen*
249: 119–127.
- 31 Greene, S. E., Martindale, R. C., Ritterbush, K. A., Bottjer, D. J., Corsetti, F. A. &
Berelson, W. M. (2012): Recognising ocean acidification in deep time: An evaluation of
the evidence for acidification across the Triassic-Jurassic boundary. *Earth-Science Reviews*
113: 72–93.
- 32 Haas, J. & Háimor, G. (2001): Geological garden in the neighborhood of Budapest, Hun-
gary. *Episodes* 24: 257–261.
- 33 Pálffy, J., Mortensen, J. K., Carter, E. S., Smith, P. L., Friedman, R. M. & Tipper, H. W.
(2000): Timing the end-Triassic mass extinction: First on land, then in the sea? *Geology*
28: 39–42.
- 34 Gradstein, F. M., Ogg, J. G. & Smith, A. G. (2004): *A Geologic Time Scale 2004*. Cam-
bridge University Press, Cambridge.
- 35 Schaltegger, U., Guex, J., Bartolini, A., Schoene, B. & Ovtcharova, M. (2008): Precise
U-Pb age constraints for end-Triassic mass extinction, its correlation to volcanism and
Hettangian post-extinction recovery. *Earth and Planetary Science Letters* 267: 266–275.
- 36 Schoene, B., Guex, J., Bartolini, A., Schaltegger, U. & Blackburn, T. J. (2010): Correlating
the end-Triassic mass extinction and flood basalt volcanism at the 100 ka level. *Geology* 38:
387–390.
- 37 Friedman, R., Mundil, R. & Pálffy, J. (2008): Revised zircon U-Pb ages for the Triassic-
Jurassic boundary and the earliest Jurassic employing the chemical abrasion pretreatment
(CA-TIMS) technique. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72: A284.
- 38 Ruhl, M., Deenen, M. H. L., Abels, H. A., Bonis, N. R., Krijgsman, W. &
Kürschner, W. M. (2010): Astronomical constraints on the duration of the early Jurassic

- Hettangian stage and recovery rates following the end-Triassic mass extinction (St Audrie's Bay/East Quantoxhead, UK). *Earth and Planetary Science Letters* 295: 262–276.
- 39 Blackburn, T. J., Olsen, P. E., Bowring, S. A., McLean, N. M., Kent, D. V., Puffer, J.,
McHone, G., Rasbury, E. T. & Et-Touhami, M. (2013): Zircon U-Pb geochronology
links the end-Triassic extinction with the Central Atlantic Magmatic Province. *Science*
340: 941–945.
- 40 Pálffy, J. & Zajzon, N. (2012): Environmental changes across the Triassic-Jurassic
boundary and coeval volcanism inferred from elemental geochemistry and mineralogy in
the Kendlbachgraben section (Northern Calcareous Alps, Austria). *Earth and Planetary*
Science Letters 335: 121–134.
- 41 Zajzon, N., Kristály, F., Pálffy, J. & Németh, T. (2012): Detailed clay mineralogy of
the Triassic-Jurassic boundary section at Kendlbachgraben (Northern Calcareous Alps,
Austria). *Clay Minerals* 47: 177–189.
- 42 Wignall, P. B. (2007): The End-Permian mass extinction - how bad did it get? *Geobiology*
5: 303–309.
- 43 Pálffy, J. (2003): Volcanism of the Central Atlantic Magmatic Province as a potential
driving force in the end-Triassic mass extinction. In: W. E. Hames, J. G. McHone, P. R.
Renne, & C. Ruppel (eds.): *The Central Atlantic Magmatic Province: Insights from fragments*
of Pangea. Geophysical Monograph Series Vol. 255–267.
- 44 Barnosky, A. D., Matzke, N., Tomiya, S., Wogan, G. O. U., Swartz, B., Quental, T. B.,
Marshall, C., McGuire, J. L., Lindsey, E. L., Maguire, K. C., Mersey, B. & Ferrer, E. A.
(2011): Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* 471: 51–57.
- 45 Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): *Climate Change 2013 – The*
Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the
Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- 46 Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A. & Kleypas, J. A. (2009): Ocean acidification: The
other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science* 1: 169–192.
- 47 Vadász E. (1927): *A geológus munkája. Bevezetés a földtani megfigyelésbe*. Danubia, Pécs.

