A COLORADO-FENNSÍK GEOLÓGIÁJA

Kanyonkavalkád

A méltán világhírű Grand Canyon („Nagy Szurdok") csupán egyike az amerikai nyugaton húzódó Colorado-fennsík természeti csodáinak. A plató a belső erők, valamint a víz, a szél munkája és a fagyaprózódás által kialakított különleges és érdekes képződmények, kanyonok, sziklatornyok, sziklaívek valóságos tárháza. Nem csupán a természetrajongók számára jelent igazi kincsesbányát, de értékes helyszínül szolgál a geológiai, geomorfológiai tárgyú kutatásoknak is.

Az Egyesült Államok délnyugati részén elhelyezkedő 337 000 négyzetkilométer területű Colorado-fennsík négy állam területén fekszik, melyek közül Colorado nyugati régióinak jelentős részét, Utah keleti és déli, Új-Mexikó északnyugati, valamint Arizona északi részét foglalja el. Természetes határait északon és keleten a Sziklás-hegység, nyugaton és délen a Nagy-Medence úgynevezett Basin and Range domborzattípusa jelentik. A fennsík egyes részei (a Colorado folyó völgyében) 1000 méternél alacsonyabb tengerszint feletti magasságon, míg területének uralkodó hányada 1500 méternél magasabban fekszik. A platón az alacsony éves csapadékmennyiség (150-400 mm) miatt sivatagi, félsivatagi térszínek jellemzők, a magasabban fekvő, csapadékosabb területeken erdők is találhatók.

Az USA nagytájai közül itt helyezkednek el legsűrűbben a nemzeti parkok, melyek a terület 2,6 százalékát foglalják el. Több tucatnyi védett tája között számos Nemzeti Emlékhely (National Monument), Állami Park (State Park), továbbá Nemzeti Erdőség (National Forest) szerepel.

A XVI. században a spanyolok a legendás Hét város keresése közben fedezték fel Észak-Amerika belső területeinek nagy részét, köztük a Colorado folyó vidékét is bejárták, így ők jutottak el az európaiak közül elsőként a Colorado-fennsíkra.

A Colorado-plató kialakulása és tektonikai evolúciója

A Basin and Range ma ismert morfológiája a miocén időszakot követő extenzió (kéregszerkezeti tágulási folyamat) eredményeképpen alakult ki. Ezzel szemben a Colorado-fennsík sokkal kevésbé deformálódott. Az 1997-2000 között végzett GPS-mérések tanúsága szerint például a fennsík északi részeihez képest a nevadai Ely-től nyugatra eső területek körülbelül évi 3 milimétert mozdulnak el [1].

A Colorado-fennsík alatti kéregvastagság — a Mohorovičić-diszkontinuitás (MOHO) mélysége — 30-50 kilométer között változik. A MOHO Nagy-Medence alatti 30 kilométeres mélységéről a kéreg központi Colorado-fennsík alatti 45-50 kilométerig vastagszik,

kelet felé a Rio Grande-riftig ismét vékonyodik 35 kilométerig [2]. A meglehetősen nagy tengerszint feletti magasságú fennsík szerkezetileg nagyrészt érintetlen maradt, a jelentős mértékű kiemelkedés ellenére hiányoznak az erőteljes deformációk. Az pedig külön geológiai érdekesség, hogy a plató peremeit övező provinciák a tektogén folyamatok hatására gyakran jelentősen töredezett, gyűrt kőzettömegekből épülnek fel. A geológiai múlt eseményei időben visszafelé a proterozoikumig, mintegy 1,8 milliárd évvel ezelőttig nyomozhatók, s folytatódnak a paleozoikumon és mezozoikumon át a földtörténeti harmad- és negyedidőszakig, egészen napjainkig. A felszínen és a fennsík fő tömegében uralkodó üledékes kőzetek (mészkövek, homokkövek, palák) nagy része sekély tengerekben, valamint a szárazföldek partjai menti vizekben lerakódott üledékekből keletkezett.

A Pangea-szuperkontinens szétesése során Észak-Amerika keleti részének szeparálódása egy szubdukciós zóna kifejlődéséhez vezetett a kontinensrész nyugati partjai mentén [3]. Mintegy 70 millió évvel ezelőtt a szubdukálódó Farallon-lemez alábukási szöge jelentős mértékben csökkent, ami a deformációs övezet keleti irányú eltolódását eredményezte. A nagy területeken kiemelkedéssel, töréses–vetődéses folyamatokkal együtt járó kéregdeformáció időszakához, a larámi orogén fázishoz kapcsolódik a modern értelemben vett Sziklás-hegység kialakulása is.

Széles körben elfogadott nézet szerint a Colorado-platót övező területek kiemelkedéséért szubkrusztális (földkéreg alatti) folyamatok felelősek. Vizsgálatok alapján konvektív feláramlás és a litoszféra-vastagság megváltozása játszották a fő szerepet a fennsík kiemelkedésében, melynek epizodikus jellege konzisztens a nagy területek alatt megvastagodott litoszférikus köpeny szakaszos áthelyeződésével [4]. Napjainkban ennek a Yellowstone Nemzeti Park környékén található a központi régiója.

A térség tengeri eredetű üledékes kőzetek tanúsága szerint a késő krétában tengerszintközeli magasságú lehetett, a felszín jelentősebb magasságváltozása a kora harmadidőszaki Sevier–Laramida kontrakció (térrövidülés) idejére tehető [5]. Mások szerint a több szakaszban lezajlott kiemelkedés különböző helyeken, különböző időszakokban ment végbe a köpenyfeláramlásnak köszönhetően. Extenzió és bazaltos vulkánosság a központi Basin and Range övezetben egybeesik a köpenyfeláramlás keleti irányú regressziójával és a déli Colorado-plató dinamikus kiemelkedésével. A folyamatot leíró tanulmány szerzői szerint a kiemelkedés centrális zónája a fennsík délnyugati peremétől északkelet felé vándorolt, ami egyébként konzisztens a fiatal Grand Canyon modellel [6].

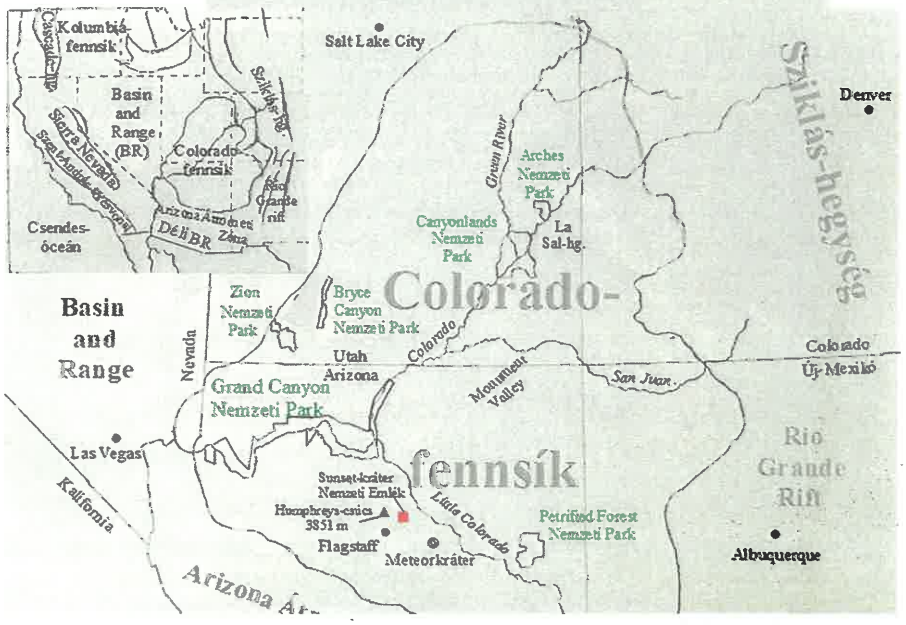
A kiemelkedéssel együtt járó kéregdinamikai folyamatok töréseket is eredményeztek a fennsík néhány régiójában. Törések mentén kialakult vulkanizmus kezdődött mintegy 6 millió éve a San Francisco vulkáni mező nyugati részén, majd ezt követően 600 vulkáni csatornát létrehozva vándorolt fokozatosan keleti irányba. A vulkáni aktivitás a Flagstaff mellett található Sunset-kráter vulkáni erupciójával tetőzött körülbelül 900 évvel ezelőtt. A 2100 méter tengerszint feletti magasságú térszínből 300 méterre kiemelkedő salakkúp és a közvetlen környezetében történt geológiai események emlékét az 1930-ban alapított Sunset Crater Volcano Nemzeti Emlékhely őrzi.

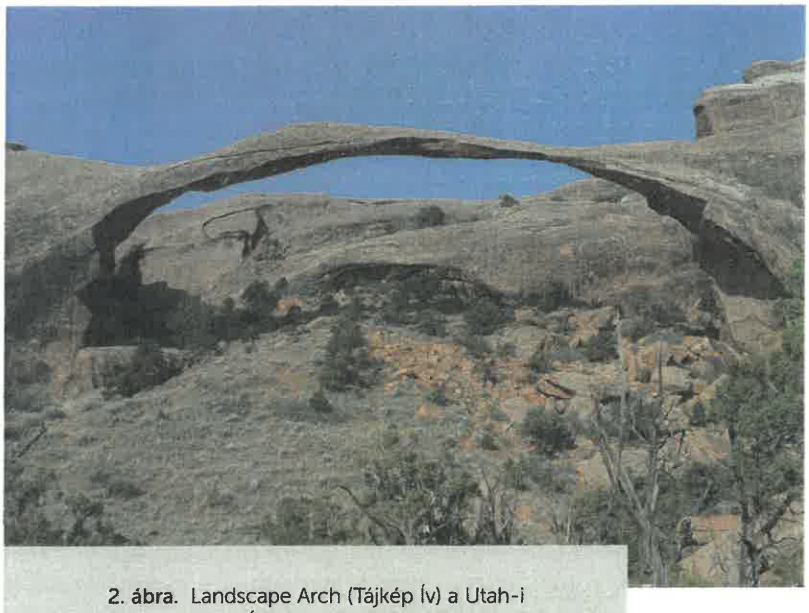
A fennsík geomorfológiai képe

A fennsík területének mintegy 90 százaléka a Colorado folyó és mellékágainak (Green River, Little Colorado, San Juan) vízgyűjtő területéhez tartozik. A 2330 kilométer hosszú Colorado Denvertől nyugatra, a Sziklás-hegységben ered és a Kaliforniai-öbölbe torkollik. A többnyire félsivatagi, sivatagi klímaterületeken keresztülhaladó, főként hegységek hóolvadékvizeiből táplálkozó folyó a rajta épült gátak megerősítése előtt szélsőséges vízjárású volt.

A tájegységeket és tájrészleteket a fennsík számos pontján magas fokú geodiverzitás jellemzi, ami legfőképpen a felszínformák változatosságában, formagazdagságában nyilvánul meg. Száraz kontinentális éghajlaton, félsivatagi klímaviszonyok mellett a különféle

1. ábra. A Colorado-fennsík sematikus térképe a környező tektonikai provinciákkal





2. ábra. Landscape Arch (Tájkép Ív) a Utah-i Arches (Ívek) Nemzeti Parkban
(Forrás: Egyesült Államok Geológiai Szolgálata, USGS)

kőzetek eltérő mértékű eróziója sok esetben egészen különleges sziklaalakzatok kifejlődéséhez vezetett, fantasztikus formavilágúk messze földön méltán híressé teszi az őket őrző védett területeket. A kőzetrétegekbe a folyóvizek sok helyütt mély szűk völgyeket, kanyonokat vájtak, melyek oldalfalában előbukkannak az őket hordozó fennsíkot alkotó kőzetanyag rétegei. Ezek a rétegek olykor (mint például a Grand Canyonban is) több mint egymilliárd éves geológiai múlt eseményeiről tanúskodnak.

Sziklaalakzatok fantasztikus világa

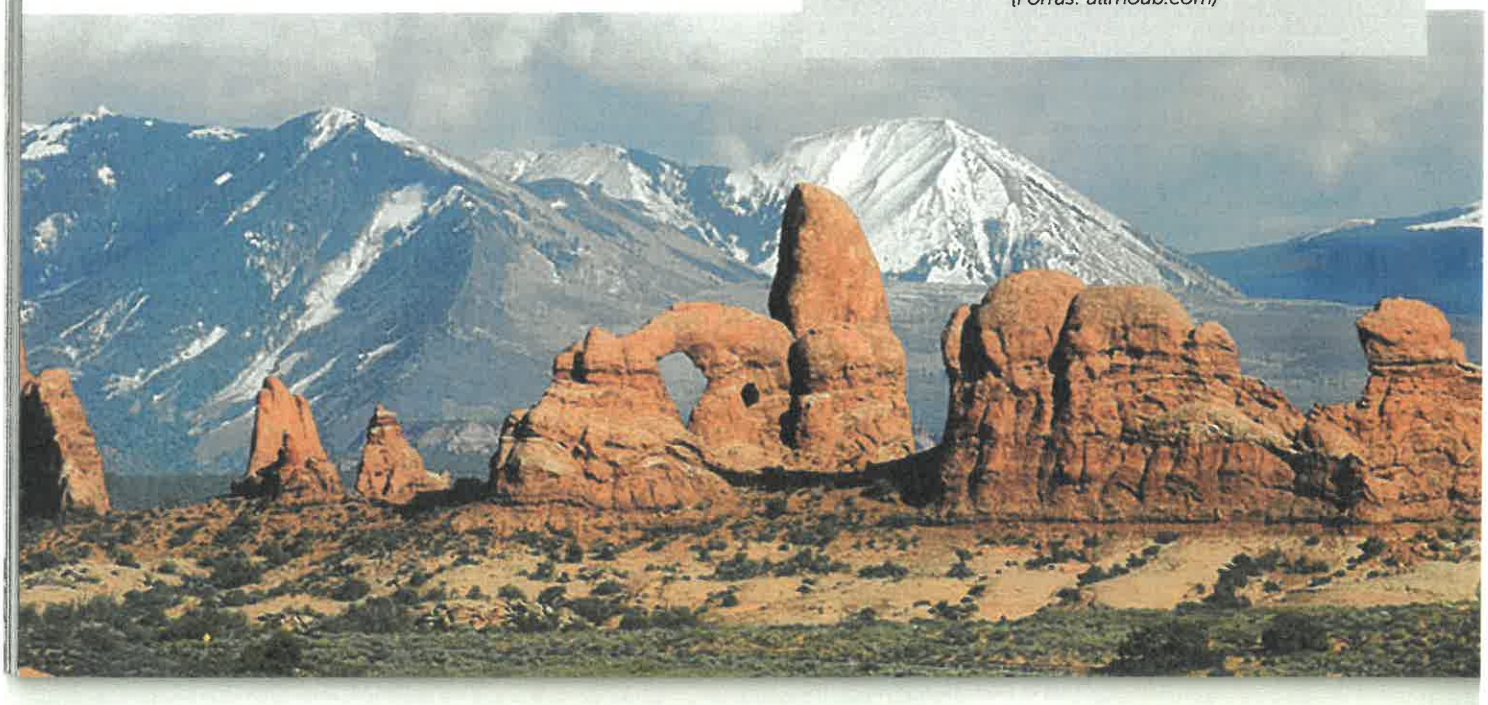
A Utah-állam keleti részén fekvő, 310 négyzetkilométeres Arches (Ívek) Nemzeti Parkban több mint 2000 természetes sziklaív, valamint sziklatornyok százai találhatók. A 30 méter magas, 88,4 méter hosszú Landscape Arch a park leghosszabb sziklaíve, s a Föld ötödik leghosszabb kőhídja.

Jiri Bruthans és kutatótársai szerint a gravitáció indukálta feszültség egy felszínformán belül elsődleges szabályozó tényezője az adott homokkő-felszínforma alaki fejlődésének. A függőleges terhelésből eredő megnövekedett feszültség adott esetben csökkentheti az eróziós rátát, ily módon fontos szerepet játszhat a sziklaívek kialakulásában, alakjuk fejlődésében [7].

Az 1928-ban alapított, 145 négyzetkilométer területű Bryce Canyon Nemzeti Park az Egyesült Államok egyik legszebb nemzeti parkja, mely több ezer sziklatornyáról nevezetes. A park legfőbb látványosságai közé tartozik a Natural Bridge-kilátóhely, ahonnét rálátni a talán legszebb sziklaívre. A számos csodás körképet nyújtó kilátópont egyike a Bryce Point, amelyről nagyszerű kilátás nyílik a Bryce-amfiteátrum oszlopaira. A Charon-formációhoz tartozó mészkő, dolomit, iszapkő (aleurit) és agyagpala különböző keménységű kőzetek. Az ebből adódó eltérő erodálódásuk eredményeképpen alakult ki a sziklatornyok és sziklatűk változatos formavilága. A szél és a csapadékvíz munkája mellett a fagyaprózódás is jelentős mértékben hozzájárult a felszínfejlődéshez.

A Közép-Utah déli részén elhelyezkedő 978,95 négyzetkilométeres Capitol Reef Nemzeti Parkot 1971-ben alapították. Nevét fehér Navaho-homokkősziklairól kapta,

3. ábra. Az Arches Nemzeti Park „ablakok" nevű részlete, háttérben a Déli-Sziklás-hegységhez tartozó La Sal-hegység
(Forrás: allmoab.com)



melyek gyakran dóm alakú képződményeket alkotnak. Ezek a Capitolium épületének kupolájára emlékeztetnek. A „reef" szó pedig errefelé szikla akadályt jelent. Sziklaívek, sziklagerincek, monolitok, tanúhegyek és színes kanyonok is találhatók a változatos felszínformakincset rejtő parkban.

A Utah és Arizona határvidékén található, westernfilmek kedvelt helyszínéül is szolgáló Monument Valley Nemzeti Emlékhely területén a legidősebb kőzetek vas-oxiddal feldúsult vörös színű iszapkövek. A szél eróziós munkája által formált 150-300 méter magas, a felszín eredeti magasságát őrző tanúhegyeket szintén a perm időszakból származó kőzetek, palák és homokkő alkotják.

A kanyonok földjén

A Colorado-fennsík nyugati peremén található Zion Canyon területe egy alacsony tengerszint feletti magasságon fekvő medence volt 240 millió évvel ezelőtt, melyre a környező hegységekből erodálódott homokot, kavicsot és agyagot a folyók, patakok szállították és halmozták fel. A különböző forrásból származó üledékekből különböző kőzetek képződtek (mészkő, homokkő, agyagpala). Később a terület nagyarányú — mintegy 3000 méteres — kiemelkedése erőteljes eróziót generált. A gyorsan áramló folyók és patakok munkavégző képessége megnövekedett, az általuk szállított sziklatörmelékkel pedig mély és szűk kanyonokat alakítottak ki a kőzetrétegekben.

Az 1367 négyzetkilométeren elterülő Canyonlands Nemzeti Park impozáns kanyonvilágának kialakulásában a Colorado folyó és a Green River játszották a fő szerepet. A sekély beltengeri üledékfelhalmozódási időszakot követően a földtörténeti középidőben a területet homokdűnék borították. A különböző forrásokból származó üledékrétegekből később különféle üledékes kőzetek keletkeztek. A felszín formakincsének kifejlődésében itt is meghatározó jelentőséggel bírt a terület kiemelkedése, mellyel párhuzamosan a folyóvizek a felszínbe történő bevágódással kanyonok és vízmosások összetett hálózatát hozták létre. A Canyonlands név igazán ráillik a parkra, hiszen a két nagy folyónak számos mellékága van, melyek szintén részt vesznek a kanyonképződésben. A nagy felszíni tagoltság következtében a park három nagyobb régióra különül, melyek közül az Island in the sky a leglátogatottabb, míg a Needles (Tűk) és a Labirintus már nehezebben megközelíthető területek.

A Grand Canyon

A Colorado-plató lenyűgöző kanyonvilágának leggrandiózusabb és talán legszebb formaegyüttesét az Arizona államban található, több mint 400 kilométer hosszúságú Grand Canyon jelenti, melynek szélessége eléri a 30 kilométert, legnagyobb mélysége pedig meghaladja az 1800 métert. A kanyont magába foglaló régiót először 1893-ban helyezték védelem alá, majd az 1919-ben megalakult nemzeti park területét 1975-ben tovább bővítették.

A kanyon legalsó részén 2 milliárd éves kőzetek helyezkednek el, felettük azonban csupán 520-530 millió éves kambriumi, tengeri eredetű üledékes kőzetek rakódtak le. Így a kőzethatáron mintegy másfél milliárd éves üledékhézag mutatkozik. A legfelső szintről lefelé haladva Kaibab-mészkő, Toroweap-formáció, Coconino-homokkő és a Hermit-formáció palakőzete települnek egymásra. Alattuk a Supai-csoport homokkövei és iszapkövei következnek, majd mészkövek, valamint a Tonto-formáció mészköve, palája és homokköve alkotják a jelenlegi kanyonfal középső zónáját. A kanyon mélyét a proterozoikumi Grand Canyon szupercsoport kőzetei, valamint a kétmilliárd éves Vishnu-alapkőzet alkotják (grandcanyon.com).

4. ábra. A Grand Canyon déli pereme a Hopi Point-nál
(A szerző felvétele)

A navahóknak megvannak a saját legendáik a kanyon keletkezéséről. Az egyik szerint egykor a sok esős nap elteltével a víz már a hegyek tetejénél is magasabbra emelkedett, majd miután elapadtak az esőzések, a vizek szintje gyorsan lecsökkenve kifaragta a kanyont.

A Grand Canyon kialakulásának részletei a mai napig nem teljesen tisztázottak. Abban azonban a legtöbb kutató egyetért, hogy az összetett völgyrendszer létrejöttében csakúgy fontos szereppel bírtak az

amerikai nyugat nagy tengerszint feletti magasságú területeit létrehozó köpeny- és kéregdinamikai folyamatok, mint a kanyont hordozó fennsík emelkedésével párhuzamosan megnövekedett erózió. A legutóbbi évmilliók során a Colorado folyó segített a felszínalakító folyamatokban, ám a lemeztektonikai események szerepe ugyancsak meghatározó jelentőségű a Grand Canyon evolúciójában. Az új kutatások tükrében pedig valószínű, hogy a Grand Canyon kialakulása több szakaszban mehetett végbe, melyek együttese több tízmillió évet ölel fel.

5. ábra. Az arizonai Meteor-kráter *(A szerző felvétele)*

A Hurricane-szegmens és a keleti Grand Canyon 70-55 millió, illetve 25-15 millió év között keletkezhetett. Ezzel szemben a Marble Canyon és a Grand Canyon legnyugatibb része meglehetősen fiatal, az utóbbi 5-6 millió év során alakulhatott ki. A ma ismert Grand Canyon a Colorado folyó által az úgynevezett paleokanyonok egyesítése útján alakulhatott ki [8].

A Grand Canyontól északra fekvő régióban a litoszféra lassan süllyed, ami valószínűleg hozzájárult a kanyon kialakulásához is, mivel a fennsík 6 millió éve tartó emelkedése befolyásolta a Colorado folyásirányát [9].

A Grand Canyon napjainkban is mélyül és folyamatosan változik. A most is zajló kéregdinamikai folyamatok mellett, a folyóvizek eróziós munkája szintén aktív szerepet játszik az összetett völgyrendszer további fejlődésében.

Kozmikus sebhely: A Meteor-kráter

A Flagstafftól mintegy 60 kilométerre, délkeletre található Arizonai (Barringer) Meteorkráter Földünk egyik legjobban megőrződött becsapódásos eredetű (impakt) krátere. A 45 000 évvel ezelőtt a Déli-Colorado-fennsíkba csapódott 30-50 méter átmérőjű vas aszteroida explóziója 175 millió tonna kőzetanyag kidobódását, valamint egy 1,2 kilométer átmérőjű és 170 méter mély kráter kialakulását eredményezte.

A kráteraljzaton posztimpakt tavi üledék és allúvium nyomozható 30 méter vastagságban. A belső kráterfal alsó szegmensét lejtőtörmelék borítja, a legalsó látható egységben permi Coconino-homokkővel, fehér, finom szemcsés kvarc–homokkő rétegekkel. Felette 3 méter vastagságban a Toroweap-formáció következik fehér és sárgásbarna színű meszes homokkővel. A kráterfal fő egységét 80 méter vastag Kaibab-formáció képezi fehéressárga, sárga dolomitokkal és homokkővel. E szekvencia legfelső rétege perm–triász Moenkopi-formáció. A meteorkráter nagyjából 1-2 kilométer sugarú környezetében megtalálhatók a Kaibab-, a Moenkopi-, valamint a Coconino-homokkő kidobódott kőzetei [10].

FUTÓ PÉTER

Nyitókép: Monument Valley

IRODALOM

[1] Niemi N. A. et al. (2004): BARGEN continuous GPS data across the eastern Basin and Range province, and implications for fault system dynamics. *Geophysical Journal International.* 159. 842-862.

[2] Wilson D. C. et al. (2010): High-resolution receiver function imaging reveals Colorado Plateau lithospheric architecture and mantle-supported topography. *Geophysical Research Letters.* 37. L20313.

[3] Coney P. J., Reynolds S. J. (1977): Cordilleran Benioff zones. *Nature.* 270. 403-406.

[4] Roberts G. G. et al. (2012): An uplift history of the Colorado Plateau and its surroundings from inverse modeling of longitudinal river profiles. *Tectonics.* 31. TC4022.

[5] Flowers R. M. (2010): The enigmatic rise of the Colorado Plateau. *Geology.* 38. 671-672.

[6] Moucha R. et al. (2009): Deep mantle forces and the uplift of the Colorado Plateau. *Geophysical Research Letters.*36. L19310.

[7] Bruthans J. et al. (2014): Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion. *Nature Geoscience.* 7. 597-601.

[8] Karlstrom K. E. et al. (2014): Formation of the Grand Canyon 5 to 6 million years ago through integration of older paleocanyons. *Nature Geoscience.* 7. 239-244.

[9] Levander A. et al. (2011): Regional Colorado Plateau Uplift by Delamination and Thermo-Chemical Downwelling of North American Lithosphere. *Nature.* 472. 461-465.

[10] Poelchau M. H. et al. (2009): Rim uplift and crater shape in Meteor Crater: Effects of target heterogeneities and trajectory obliquity. *Journal of Geophysical Research.* 114. E01006.

KÖVETKEZŐ SZÁMUNK TARTALMÁBÓL

KILICSI ÁGNES: Az érsek és a halók

POCZAI PÉTER: Az öröklődés alapelvei és filozófiai fogalmai

KUBASSEK JÁNOS: Cholnoky Jenő emlékezete