

**PSZEUDOKARSZT A SZÁRAZ-ANDOKBAN? – AZ OJOS DEL SALADO OLVADÁSHOZ KÖTHETŐ FELSZÍNFORMÁI**

**PSEUDOKARSTIN THE „ARID-ANDES”? –LANDFORMS OF MELTING ORIGIN IN THE OJOS DEL SALADO AREA**

MARI LÁSZLÓ<sup>1</sup> –NAGY BALÁZS<sup>1</sup> – HEILING ZSOLT<sup>2</sup> –  
NEMERKÉNYI ZSOMBOR<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ELTE Természetföldrajzi Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C,  
[malkact@caesar.elte.hu](mailto:malkact@caesar.elte.hu), [balazs@afoldgomb.hu](mailto:balazs@afoldgomb.hu)

<sup>2</sup>A Földgömb az Expedíciós kutatásért Alapítvány, [hezso@heiling-media.hu](mailto:hezso@heiling-media.hu)

<sup>3</sup>MTA CSFK Földrajztudományi Intézet [zsombor@afoldgomb.hu](mailto:zsombor@afoldgomb.hu)

*Abstract: In January 2012, The Földgömb Foundation for Expedition Research launched a surveying expedition with the aim of starting a long-term data collection on the world's highest volcano, the 6893 m high Ojos del Salado (Chile-Argentina). The expedition's importancelies in the location, that this wasthe first long-termenvironmental and climate measurement at such a high-altitudeon Earth. The main rationale of our research is that this area is obviouslyan extreme environment but the major causing factor for it sextremity are stillun discovered. The climatics now line is here the highest, theoretically at 7000 m a.s.l., glaciers and areas covered with icedo not occur. As theresidues of earlier humid periods, smaller, buried blocks of icearestillfoundon Ojos del Salado, on which duetothemelting glacial pseudokarst forms appear.*

## **Bevezetés**

A Földgömb az Expedíciós Kutatásért Alapítvány által 2012 januárjában indított környezeti állapotfelmérő és adatgyűjtő expedíció bolygónk legmagasabb vulkánján, a Chile és Argentína határán a „Szár az-Andokban” magasodó, Ojos del Salado tűzhányón zajlik. A vállalkozás különlegességét a helyszín (az extrém környezet), valamint az a tény jelenti, hogy ilyen magasságban még nem folyt hosszú távú környezeti(klíma) mérésorozat a Földön.

A terület felszínfejlődési különlegességeit elemző cikkek (*MILANA* 2009, *DE SILVA* 2010, *MILANA* et al. 2010, *BRIDGES* et al. 2012) a Föld itt fellelt legnagyobb eolikus üledékfodraival („*megaripples*”), ill. az ezek kialakulásához szükséges szélerősséggel foglalkoznak. Mindezek mellett

rávilágítanak arra is, hogy e térség az egyik legkiválóbb földi Mars-analóg helyszín.

Vizsgálatsorozatunk jelentősége, hogy a kutatási helyszín olyan terep, amelyről ismert ugyan, hogy ott igen szélsőséges környezeti viszonyok uralkodnak, de mindezek alapjai, kialakító fő tényezői még feltáratlanok. A hosszú távú monitoring vizsgálat a terepi adatgyűjtéssel, majd a feldolgozással az extrém helyszín olyan környezeti paramétereiről (elsősorban a periglaciális környezetről és a permafrosztról) ad alapinformációkat, amelyek változásai egyben a klímaingadozás dinamizmusának, következményeinek jelzői is (NAGY et al. 2012).

### A helyszín

Az Andok legszárazabb része, a Puna de Atacamának nevezett magassíksík és az innen kiemelkedő 6000 méternél magasabb tűzhányók a Föld egyik legextrémebb környezetét alkotják.



1. ábra: Az Ojos del Salado áttekintő térképe  
Figure 1: Overview map of Ojos del Salado

Itt található bolygónk legmagasabb vulkánja, a 6893 m-es Ojos del Salado (27° 06' 34.6" D, 68° 32' 32.1" Ny), amely a chilei-argentín határon rendkívül hideg és száraz területen jégsapka nélküli hegytömegként tornyo-

sul (1.ábra). Ám sem a hideg, sem a szárazság pontos mértékéről nincsenek adataink. A tengerszint felett 6000 m körüli magasságban gyakran előfordulnak -20 °C-os nyári, nappali hőmérsékletek, az 5000 m fölötti területen pedig eső egyáltalán nem jellemző, ám néhány órás havazás szinte minden nyári héten várható, bár a hó gyorsan és teljes mértékben elszublimál. A hóviszonyokról, ill. a térség állandó, felszíni jegének előfordulásáról távérzékeléses elemzés készült (GSPURNING et al. 2006), azonban a gyakran csak rövid ideig tartó aktuális hóborítás miatt mind a csapadékatatok, mind az olvadékvíz-bebecslések bizonytalanok.

Földünkön itt húzódik legmagasabban az éghajlati hóhatár (7000 m körül), állandó jégborítás nincs, itt találunk legmagasabban – időszakos – tavat (6500 m). Ez bolygónk legmagasabban fekvő sivataga (kb. 6200 m-es magasságig húzódik).

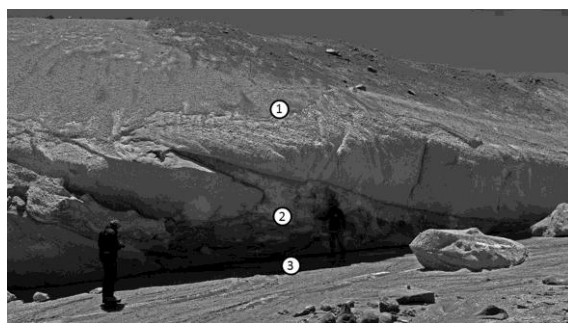
Maga az Ojos del Salado kialudt tűzhányó, fő működési ideje mintegy 30 ezer éve volt. Ez a vulkáni komplexum emelkedik legmagasabbra a legszélsőségesebb éghajlatú helyen, a „Száraz-Andok” puna-területén (KARÁTSÓN et al. 2011).

E sós tavakkal, az édesvíz hiányával, rendkívül gyér növényzettel, ám erős széllel és nagy mennyiségű üledéket szállító viharokkal jellemezhető, lakatlan magashegyi kötörmelék terep környezetváltozásáról, a klímaváltozás helyi hatásairól ugyanakkor nincsenek részletes adatok. Geomorfológiai felmérését is távérzékeléses módszerekkel végezték (KAUFMANN et al. 1995). Ennek oka a szélsőséges, sokszor embertelen időjárási feltételekben, a körülményes megközelíthetőségben, a nagy magasságban és a nehéz terepben is keresendő.

## **Módszertan és alapadatok**

Kutatásaink során részletesen feltártuk az Ojos del Salado környezetének geomorfológiai viszonyait, hiszen mérőhelyeink kijelöléséhez ez elengedhetetlenül szükséges volt. A geomorfológiai vizsgálatok két fő csapás mentén folytak. Egyrészt a területről rendelkezésre álló, több időpontban készült, 1\*1 méteres terepi felbontású űrfelvételeket elemeztük. A felvételek a Google Earth szerveréről érhetők el. A vizsgálatokhoz három időpont (2007. április 29., 2008. december 16., 2012. április 17.) felvételeit értékeltük ki, így a felvételeken már kimutathatóak voltak változások és le tudtuk szűkíteni azokat a területeket, ahol részletes terepi bejárásra és felvételezésre volt szükség. A munka oroszlánrésze a terepen történt. 2012 januárjában és február elején, valamint 2014 februárjában végeztük a terepmunkát. A terepbejárás során 5200 méter tengerszintfeletti magasságban, az Atacama-tábor

környékén húzódó völgyben eltemetett holtjégtömböket és eltemetett firnfoltokat tártunk fel. A jeget és firnfoltokat homok és horzsakőrétegek borították helyenként több méteres vastagságban (1-2. képek). A fedőanyagot a területre jellemző igen erős szelek halmozták fel. A jelenleg fedett illetve kitakaródzó állapotban lévő jég egy korábbi nedvesebb időszak maradványa. A terepbejárás során korábbi gleccserek moréna sáncai is azonosíthatók voltak, illetve kb. 6300 méteres tengerszintfeletti magasságban megtaláltuk az egykori gleccser pusztuló maradványát. A jelenlegi éghajlati körülmények nem teszik lehetővé jég felhalmozódását, a lehulló hó általában pár nap alatt elszublimál. A jég olvadása a felszínen, több helyen a karsztokhoz hasonló formakincs (glaciális pszeudokarszt, *EBERHARD – SHARPLES* 2013) megjelenését idézte elő.



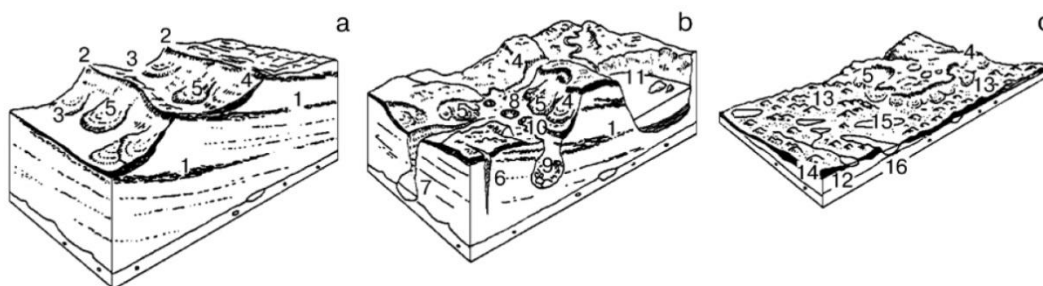
1.kép: Holtjég feltárása  
 Jelmagyarázat: 1. horzsakő és homokréteg, 2. jég, 3. olvadékvíz  
 Picture 1: Deadiceoutcrop  
 Legend: 1. pumice and sandlayer 2. ice, 3. meltwater



2.kép: A kitakaródzó jégen megfigyelhető különböző körülmények között felhalmozódott, eltérő színű jégrétegek  
 Picture 2: Deadiceoutcrop

## Pszudokarsztos formák

Az Ojos del Salado leglátványosabb pszudokarsztos formakincse az 5200-5300 m tengerszintfeletti magasságban, az Atacama-tábor környékén húzódó völgyben figyelhető meg. E terület KRÜGER (1994) osztályozása szerint a fejlett és az elaggott stádium jegyeit mutatja (2. ábra).

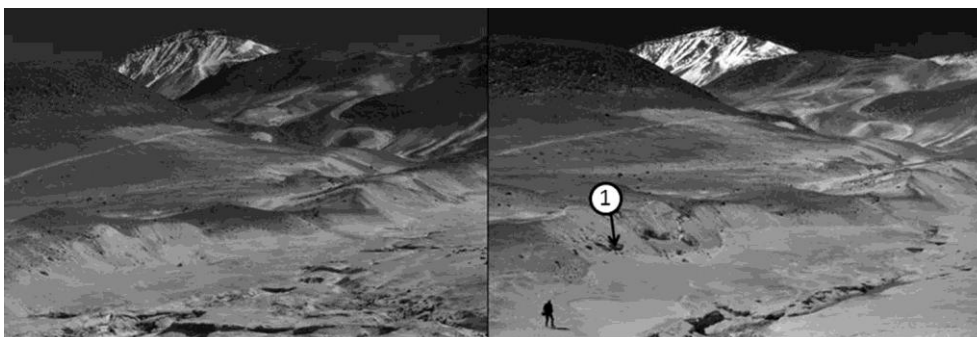


2. ábra: A fejlett és elaggott glaciális pszudokarszt stádiumai (Krüger, 1994)  
 Jelmagyarázat: a-b) fejlett; c) elaggott stádium; 1.kőzettörmelék csikok a gleccserjégben, 2.jégmagvú vonulatok, 3.teknő alakú völgy, 4.olvadékvíz lefolyás, 5.kőtörmelék-folyás, 6. olvadással kitágított repedések, 7.szub-glaciális csatornák, 8.pszudotöbrök, 9.beszakadt jégbarlang, 10. olvadással és omlással tágított pszudotöbrök, 11.olvadékvíz táplálta tó, 12.holtjég, 13.jégmentes dűbös-dombos síkság, 14. glaciális üledékek, 15.tavak, 16.szubglaciális üledékek.

Figure 2: Block-diagram showing development of mature and decrepit glacial pseudokarst stages (Krüger, 1994).  
 Legend: a-b) mature stage; c) decrepit stage; 1. strips of rock fragments in glacial ice, 2. ridges with ice core, 3. through-shape valley, 4. melting escapes of clean ice, 5. rock fragments flow (colifluction), 6. crevasses expanded by melting, 7. subglacial channels, 8. dolines, 9. collapsed arch of tunnel, 10. doline expanded by melting and collapse, 11. lake extending due by melting on slopes, 12. dead ice, 13. hummocky plain, free from ice, 14. superficial glacial sediments, 15. lakes, 16. subglacial sediments.

A jég olvadása a rövid nyári időszakra korlátozódik, napközben néhány fokkal a fagypont fölé emelkedhet a hőmérséklet a napsütötte helyeken (az árnyékos részeken általában nem emelkedik 0 °C fölé a hőmérséklet), ekkor indul meg az olvadás, majd éjszaka nyáron is fagypont alá hűl a levegő és a felszín hőmérséklete így újra megfagy a víz. Az olvadás akkor gyorsul fel, amikor az eltemetett jégtömb a felszínre kerül. Az olvadékvizek bevágódnak a völgytalpon, alámoszák a völgyoldalakat és a jeget fedő homok lecsúszik. E folyamat viszonylag rövid idő alatt megváltoztatja a völgy morfológiáját. A 3. képen erre láthatunk szép példát. A 2012-ben készült fotón egy korábbi gleccser oldalmorénáját figyelhetjük meg, nem sejthető, hogy a moréna és homokréteg alatt eltemetett jégtömb rejtőzködik. Az ugyanarról a helyről készült 2014-es felvételen jól látható, hogy több helyen (egyikre mutat a nyíl hegye) megszakadt a moréna-homok takaró és kibukkan a holtjég. A jég olvadásából származó nedvesség átítatja a fedő homokréteget, amely a meredek völgyoldalon megsúszik, így egyre nagyobb területen

takarózik ki a jég. Az olvadékvíz a napi felmelegedés függvényében kisebb-nagyobb vízhozammal folyik a völgytalpon. A vízfolyás a völgy mélyítését és szélesítését nem csak erodáló hatásával végzi, hanem olvasztja is a fagyott mederfeneket.



3.kép: Az Atacama-tábor melletti völgyszakasz 2012 februárjában (bal oldali kép) és 2014 februárjában (jobb oldali kép).

Jelmagyarázat: 1. kibukkanó holtjég

Picture 3: Valley near the Atacama camp in February 2012 (left side) and February 2014 (right side)

Legend: Dead ice outcrop

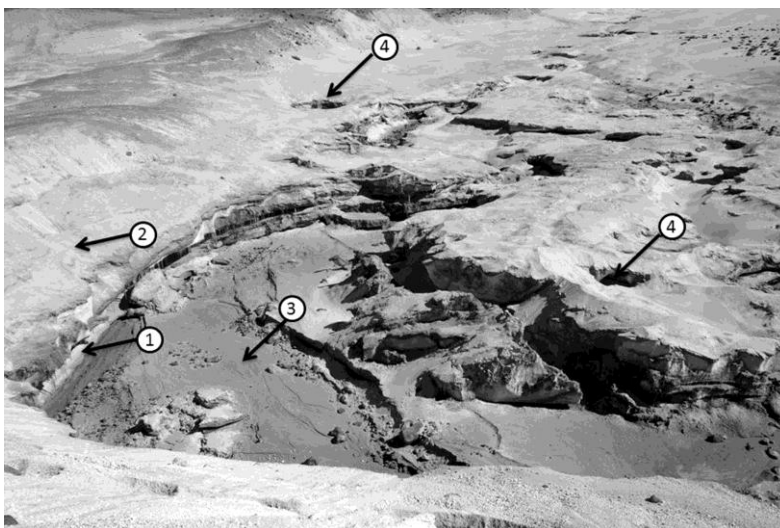
A holtjég-tömb olvadása megindulhat az elvékonyodó homokréteg alatt is, aminek az lesz a felszíni következménye, hogy a homok tömörödik, kerekded, sekély mélyedések, a fedett karsztok szuffóziós, utánsüllyedésszerű töbreihez (FORD – WILLIAMS 1989) hasonló alakzatok jönnek létre (4. kép). Az így kialakult szuffóziós, utánsüllyedésszerű pszeudotöbrök átmérője elérheti a 4 métert, mélységük 0,5-1,5 méter között változik, lejtőjük lankás.



4.kép: Olvadékvíz és szélformálta völgyszakasz az Atacama-tábor közelében  
Jelmagyarázat: 1. horzsakő és homokréteg, 2. jég, 3. szuffóziósutánsüllyedésszerű pszeudotöbör

Picture 4: Valley near Atacama camp formed by meltwater and wind  
Legend: 1. pumice and sand layer 2. ice, 3. suffusion subsidence pseudodoline

Az olvadékvíz táplálta időszakos vízfolyás bevágódva meredek oldalú völgyszakaszokat alakít ki, viszont több helyen nem tudja átvágni a völgytalpat teljesen kitöltő, falként emelkedőeltemetett holtjég-tömböket (5. kép). A völgyet kitöltő jég alatt utat találó olvadékvíz jég alatti alagutat olvaszt magának. Ezekben az alagutakban (jégbarlangokban) a jég alulról olvadván tágíthatja az üreget, felharapódzik a fedő anyagig. Ha nagyméretű üreg alakul ki, akkor a fedő moréna, horzsaköves homok beszakad és a felszínen lyuk képződik. Kialakul a lezökkenéses (VERESS 2006), utánsüllyedékes pszeudotöbör (5-6. képek). Alakjuk igen változatos lehet az egyszerű kerekded beszakadástól a többszörösen összetett, válaszfalakkal több részre osztott formáig (7. kép). Átmérőjük a vizsgált területen 3-5 méter, mélységük 6-10 méter között változik. Peremüktől kb. 30°-os lejtőszöggel húzódnak a fedőüledéken kialakult lejtők, majd a jég határán hirtelen megtörnek és meredek, túlhajló falakban folytatódnak a beszakadás aljáig. A beszakadt fedőüledék anyagát a vízfolyás elszállítja. A fedőüledék és a jég határán a napsütéses oldalon megolvadó víz lefelé folyva gyorsan lehül, és hatalmas jégcsapokat formálva megfagy. A napi ritmusban ismétlődő fagyás-olvadás látványos alakzatokat hoz létre. Az állandóan fújó erős szelek a pszeudotöbör felső, a fedőüledékben kialakult részét alakítja át folyamatosan.



5. kép: A vizsgált terület az Atacama-tábor közelében  
 Jelmagyarázat: 1. jég, 2. horzsakő és homokréteg, 3. olvadékvíz, 4. lezökkenéses pszeudotöbör  
 Picture 5: The investigated area near Atacama camp  
 Legend: 1. ice, 2. pumice and sand layer, 3. meltwater, 4. downcast dropout subsidence pseudodoline

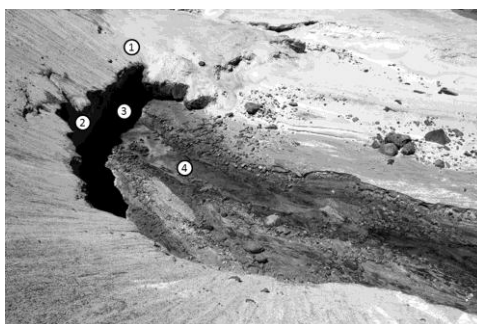


6. kép: Lezökkenéses, utánsüllyedéses pszeudotöbör az Atacama-tábor közelében  
 Picture 6: Downcast dropout subsidence pseudodoline near the Atacama camp



7. kép: Összetett lezökkenéses, utánsüllyedéses pszeudotöbör az Atacama-tábor közelében  
 Picture 7: Multiple downcast dropout subsidence pseudodoline near the Atacama camp

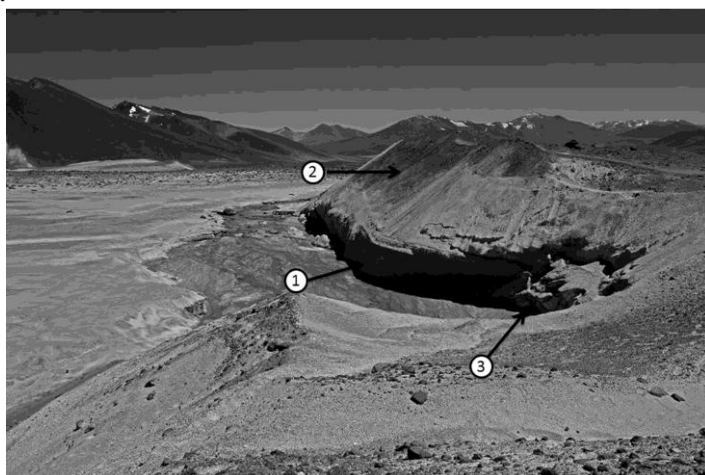
A jégtömb alatt kialakult jégbarlang nem hasonlítható a nagy gleccsereken tanulmányozható jégbarlangokhoz, mert sohasem jön létre nagy vízhozam, így széles, de alacsony járatok jönnek létre. Magasságuk csak helyenként haladja meg az egy métert, szélességük azonban elérheti a 3-4 métert is. Kilépési helyük is általában széles, alacsony kapu, túlhajló jégfallal (8. kép).



8.kép: Jégbarlang kijárata az Atacama-tábor közelében  
 Jelmagyarázat: 1.horzsakő és homokréteg, 2.jég, 3. jégbarlang kijárata, 4. olvadákvíz  
 Picture 8: Ice cave exit near the Atacamacamp  
 Legend: 1.pumice and sandlayer, 2. ice, 3. ice cave exit, 4. meltwater



A jégbarlang kapuja olvad egyrészt a vízzel érintkező részeken, másrészt a fedőüledéktől mentes, helyenként túlhajló jégfalat a Nap is megsűtheti, amely újabb rész olvadását segíti elő. Az olvadásnak köszönhetően a barlangszáj egyre tágasabb lesz, nő az üreg mérete. Az üreg növekedésével egyre vékonyabb lesz a jégréteg, illetve az alátámasztása is bizonytalanná válik. A fedőüledék terhelésének következtében a jégtestben repedések jönnek létre és egy idő után beszakad a jégbarlang bejárati része (9. kép). A leomló, fedőüledékkel borított jégtömbök tovább olvadnak, és változatos formákat hoznak létre. Jellemző képződmények a homoksapkás jég vagy firntornyok, oszlopok (10. kép), amelyek kialakulása hasonló a kősapkás földpiramisok képződéséhez, csak itt sokkal gyorsabb a forma születése és pusztulása.



9. kép: Beszakadt barlangkapu az Atacama-tábor közelében  
 Jelmagyarázat: 1. jég, 2. horzsakő és homokréteg, 3. beomlott jégbarlang,  
 Picture 9: Collapsed ice cave entrance near Atacama camp  
 Legend: 1. ice, 2. pumice and sandlayer, 3. collapsed ice cave



10. kép: Homoksapkás jégtornyok az olvadó holtjégtömb peremén  
 Picture 10: Ice towers wits and capon the edge of deadice

## Eredmények

Kutatásainkat olyan területen végeztük, ahol a szakirodalom alapján teljesen száraz, sivatagi környezet a jellemző. Terepbejárásaink alkalmával ennek ellentmondó nyomokkal, formákkal találkoztunk, pl. rövid vízfolyásokkal. Terepi kutatásaink eredményeként az Ojos del Salado 5200-5400 m tengerszint feletti magasságban elterülő részén egykori gleccser maradványait tártuk fel. A morénával, horzsakővel és homokkal fedett holtjégtömbök a nyári időszakban olvadnak, így rövid felszíni vízfolyások alakulhatnak ki. A jég olvadása látványos pszeudokarsztos formákat, különböző típusú utánsüllyedésszerű pszeudotöbröket, jégbarlangokat és homoksapkás jég illetve firntornyokat, oszlopokat hoz létre.

## IRODALOM

- BRIDGES, N.T. – DE SILVA, S.L. – ZIMBELMAN, J.R. – LORENZ R.D.* (2012): Formation conditions for coarse-grained megaripples on Earth and Mars: lessons from the Argentinian Puna and wind tunnel experiments – Third International Planetary Dunes Workshop
- DE SILVA, S.L.* (2010): Largest wind ripples on Earth? Comment – *Geology*, 38. pp. 218.
- EBERHARD, R. – SHARPLES, C.* (2013): Appropriate terminology for karst-like phenomena: the problem with ‘pseudokarst’ – *International Journal of Speleology* 42. (2) pp. 109-113.
- FORD, D.C. – WILLIAMS, P.W.* (1989): *Karst Geomorphology and Hydrology* – Unwin Hyman, London 601 p.
- GSPURNING, J. – LAZER, R. – SULZER, W.* (2006): Regional climate and snow/glacier distribution in Southern Upper Atacama (Ojos del Salado) – an integrated statistical, GIS and RS based approach – *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, 41. pp. 59-70.
- KARÁTSÓN, D. – TELBISZ, T. – WÖRNER, G.* (2011): Erosion rates and erosion patterns of neogene to Quaternary stratovolcanoes in the Western Cordillera of the Central Andes: an SRTM DEM based analysis – *Geology*, doi:10.1016/j.geomorph.2011.10.010
- KAUFMANN, V. – KLOSTIUS, W. – BENZINGER, R.* (1995): Topographic mapping of the Volcano Nevado Ojos del Salado using optical and microwave image data. -Proceedings of the 3rd International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Mendoza, Argentina, pp. 47-59.

- KRÜGER, J.*,(1994): Glacial processes, sediments, landforms and stratigraphy in the terminus region of Myrdalsjökull, Iceland. – *Folia Geographica Danica*, 21, pp. 1-233.
- MILANA, J.P.* (2009): Largest wind ripples on Earth? – *Geology*, 37. pp. 343-346.
- MILANA, J.P. – FORMAN, S. – KRÖHLING, D.* (2010): Largest wind ripples on Earth? Reply – *Geology*, 38. pp. 219-220.
- NAGY B. – MARI L. – HEILING ZS.*(2012): Magashegyi környezetváltozás-monitoring az Ojos del Saladón (6893 m): Méréssorozat – kezdet és kilátások, Egyetemi Meteorológiai Füzetek 24: pp. 50-54.
- VERESS M.* (2006): Karsztmorfológia. In: *LÓCZY D. – VERESS M.*: Geomorfológia I. Földfelszíni folyamatok és formák. – Dialóg Campus Kiadó pp. 229-326.