

KÖRNYEZETVÁLTOZÁS A SZÁRAZ-ANDOKBAN – AZ OJOS DEL SALADO MONITORING VIZSGÁLATA

ENVIRONMENT-CHANGES IN THE DRY ANDES – MONITORING RESEARCH ON THE OJOS DEL SALADO

Nagy Balázs¹, Mari László¹, Kovács József², Nemerkenyi Zsombor³, Heiling Zsolt⁴

¹ELTE Természetföldrajzi Tanszék, nagybalazs@caesar.elte.hu

²ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék

³MTA CSFK Földrajztudományi Kutatóintézet

⁴A Földgömb az Expedíciós Kutatásért Alapítvány

Abstract

In 2012 The Földgömb Foundation for Expedition Research launched a surveying expedition with the aim of starting long-term data collection on the world's highest volcano, the 6893 m high Ojos del Salado. The expedition's importance is delivered by the location and its extreme environment – the major causing factors for its extremity are still undiscovered – as well as the fact that this had been the first long-term environmental and climate measurement ever launched at such a high altitude on Earth. Data and analyses of this long-term monitoring project provide basic information about environmental parameters, moreover, their monitored changes give us insight in to the dynamism of climate change and its consequences.

Based on our data we gained detailed information about the length and dynamism of frost-melt circles, the active layer thickness, the mean annual temperature of active layer (in several depths), the current processes of glacier ice-degradation. We have explanation for the formation of local high mountain lakes, for the fossilization of megaripples by heavy sediment particles and for the lack of characteristic periglacial slope processes.

Keywords: Ojos del Salado, eolian processes, ice-degradation, permafrost, active layer, temperature monitoring

Kulcsszavak: Ojos del Salado, eolikus folyamatok, jégdegradáció, permafroszt, aktív réteg, hőmérséklet-monitoring

Bevezetés

A Földgömb az Expedíciós Kutatásért Alapítvány – több, előzetes terepfelmérő út után – 2012-ben indította el magashegyi környezetváltozás-monitoring vizsgálatát Chilében, az Ojos del Salado (6893 m) térségében. A hosszú távra tervezett kutatómunka célja a klímaváltozás okozta átalakulások pontos feltárása a Száraz-Andok legmagasabb részén. A kutatási helyszín olyan terep, amelynek környezeti extremitása ismert ugyan, de működési sajátosságai, pontos adatai még feltáratlanok. A hosszú távú monitoringvizsgálat a terepi adatgyűjtéssel, majd a feldolgozással az extrém helyszín olyan környezeti paramétereiről (elsősorban a hegyi sivatagról, a periglaciális környezetről és a permafrosztról) ad alapinformációkat, amelyek változásai egyben a klímaingadozás dinamizmusának, következményeinek jelzői is.

A jégdegradációt, az eolikus folyamatokat és az olvadékvíz-utánpótlás jellegzetességeit feltáró kutatás első lépéseként 2012-ben 4200 métertől a 6893 m-ig 5 magassági lépcsőben hőmérsékletmérő műszereket helyeztünk el a regolithban (különböző mélység-tartományokban), de emellett megkezdődtek a geomorfológiai felmérések-elemzések is. 2014-ben lezajlott a műszerek első leolvasása, folytatódtek a helyszíni geomorfológiai vizsgálatok, további műszertelepítések történtek (4600 m-en új állomás, 5300 és 5950 méteren szélszélvédők elhelyezése), elemeztük a jégdegradációt, az olvadékvíz útját és a periglaciális jelenségek elhelyezkedését, megtaláltuk a Föld legmagasabb tómedencéjét (6500 méteren) és minden nedves közegből mintát vettünk az extremofil élőlények vizsgálatához.

A kutatómunka jelen fázisában – 2 éves adatsor alapján – már ismerjük a vizsgált helyszínek olvadási és fagyási periódusainak hosszát, dinamikáját, a regolit aktív rétegének évi középhőmérsékleteit, az aktív réteg vastagságviszonyait, a gleccserdegradáció mai folyamatait. Magyarázni tudjuk a Föld legmagasabban fekvő tavainak keletkezését, mai helyzetét és kilátásait, a periglaciális tömegmozgások alárendelt szerepének okait, valamint a különlegesen aktív eolikus folyamatok során keletkezett meghatározó alakzatok, az óriásfodrok mai állapotát is.

Helyszín

Az Andok legszárazabb része, a Puna de Atacama magassíksík és az innen kiemelkedő 6000 méternél magasabb tűzhányók a Föld egyik legextrémebb környezetét alkotják. 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 (150 mm/évnél kevesebb csapadék, Messerli et al. 1997) területen jégsapka nélküli hegytömegként tornyosul. 6000 m körül gyakran előfordulnak -10 °C alatti nyári nappali hőmérsékletek, az 5000 m fölötti területen pedig eső egyáltalán nem jellemző, ám néhány óras havazás nyáron is szinte minden héten várható – a hó gyors, teljes elszublimálásával. A hóviszonyokról, ill. a térség állandó, felszíni jégének előfordulásáról távérzékeléses elemzés készült (Gspurning et al. 2006), azonban az aktuális hóborítás gyakran igen rövid jelenléte miatt mind a

csapadékadatok, mind az olvadékvíz-becslések bizonytalanok – nem beszélve a jégmaradványok, jégtípusok elkülönítéséről, degradációjának, fogyási folyamatainak meghatározásáról.

Földünkön itt húzódik legmagasabban az éghajlati hóhatár (7000 m körül, Clapperton 1994), itt találunk legmagasabban – időszakos – tavakat (6000-6500 méter között többet is), ez bolygónk legmagasabban húzódó sivataga (kb. 6000 m-es magasságig). Maga az Ojos del Salado szunnyadó tűzhányó, fő működési ideje mintegy 30 ezer éve zajlott (Moreno and Gibbons 2007), ma vulkáni kísérőjelenségek működnek rajta és környezetében néhány helyen. Méréseink adatait tehát a vulkán-jelleg nem befolyásolja, a kapott szignál a környezetre vonatkozik, nem pedig egy magma fűtötte testre. Viszont ez a hegy, mint vulkáni komplexum emelkedik legmagasabbra és a legextrémebb helyen, a „Szárász-Andok” puna-területén (Karátson et al. 2011).

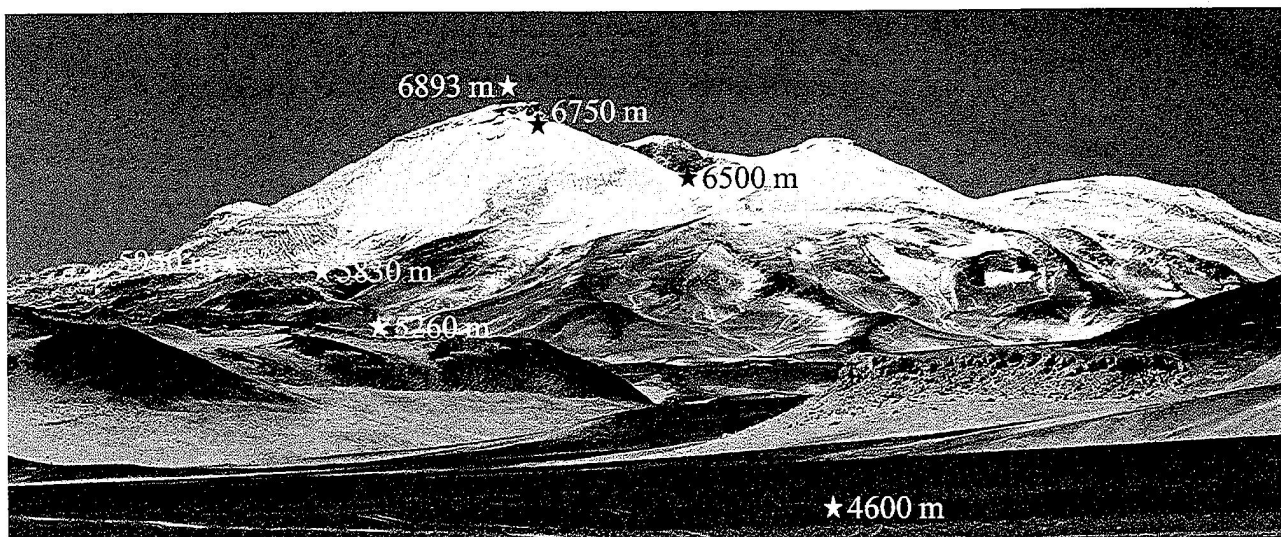
E sós tavakkal, az édesvíz hiányával, rendkívül gyér növényzettel, ám erős széllel és nagy mennyiségű üledéket szállító viharokkal jellemezhető, lakatlan magashegyi kötörmelék terep környezetváltozásáról, a klímaváltozás következményeiről nincsenek részletes adatok. A geomorfológiai felmérés is távérzékeléses módszerekkel zajlott (Kaufmann et al. 1995). Ennek oka a szélsőséges, sokszor embertelen időjárási feltételekben, a körülményes megközelíthetőségben, a nagy magasságban és a nehéz terepben is keresendő. Pedig szélsőséges szárazsága és rendkívül alacsony hőmérséklete miatt földrajzilag olyan extrém terület, amely kiváló indikátorként is működhet: mind a melegedés, mind az ezzel járó további (felszín alatti) jégolvadás, a nedvesedés és a szárazodás is dinamikusan változtathatja környezeti viszonyait. Az Ojos del Saladóra vonatkoztatott megállapítások ugyanakkor kiterjeszhetőek: a Szárász-Andok hatalmas kiterjedésű területén alapvetően hasonló magashegyi sivatagi állapotok jellemzőek. Itteni következtetéseinknek ezért regionális feltáró szerepe is van.

Módszerek, eszközök

Kutatásaink során terepbejárások, szelvényelemzések révén részletesen feltártuk az Ojos del Salado és környezetének geomorfológiai viszonyait, hiszen mérőhelyeink kijelöléséhez ez elengedhetetlenül szükséges volt. Mindehhez felhasználtuk a területről rendelkezésre álló, több időpontban készült, 1*1 méteres terepi felbontású, a GoogleEarth szerveréről elérhető űrfelvételeket (2007. április 29., 2008. december 16., 2012. április 17.). A felszín alatti hőmérsékletmérés HOBO Pro v2 dataloggerekkel folyik. A 2012-es telepítés alapján:

- 4200 m-en 10 és 35 cm mélyen (itt végül – állatbolygatás miatt – kőzetfelszíni hőmérsékletet sikerült mérni)
- 5260 m-en 10, 35 és 60 cm mélyen
- 5830 m-en 10, 35 és 60 cm mélyen
- 6750 m-en 10 és 17 cm mélyen
- 6893 m-en a felszínen és 10 cm mélyen

2014-ben 4600 méteren még egy állomást hoztunk létre (10 és 35 cm mélyen elhelyezett műszerekkel), valamint 5950 m-en, 2 m magasságban, árnyékolt helyen is elhelyeztünk egy adatgyűjtőt (1. ábra).



1. ábra. A legfontosabb vizsgálati helyszínek az Ojos del Saladón

Figure 1. The most important research sites on the Ojos del Salado

A mérési gyakoriság óránkénti, vagyis a két éves mérési periódusban egy műszerből mintegy 18 ezer adat származik. Az eolikus alakzatokat, ill. anyagukat úrfelvétel alapú képfeldolgozással, helyi szelvénykészítéssel, mintagyűjtéssel és laboratóriumi sűrűségméréssel vizsgáltuk. A nagyszemcsés hordalékszállítás vizsgálatához három szelcsapdát állítottunk föl 5300 és 5950 méteren.

A hó-firn-jég elkülönítésre terepi precíziós mérleget és Eijkelkamp mintavevőket használtunk.

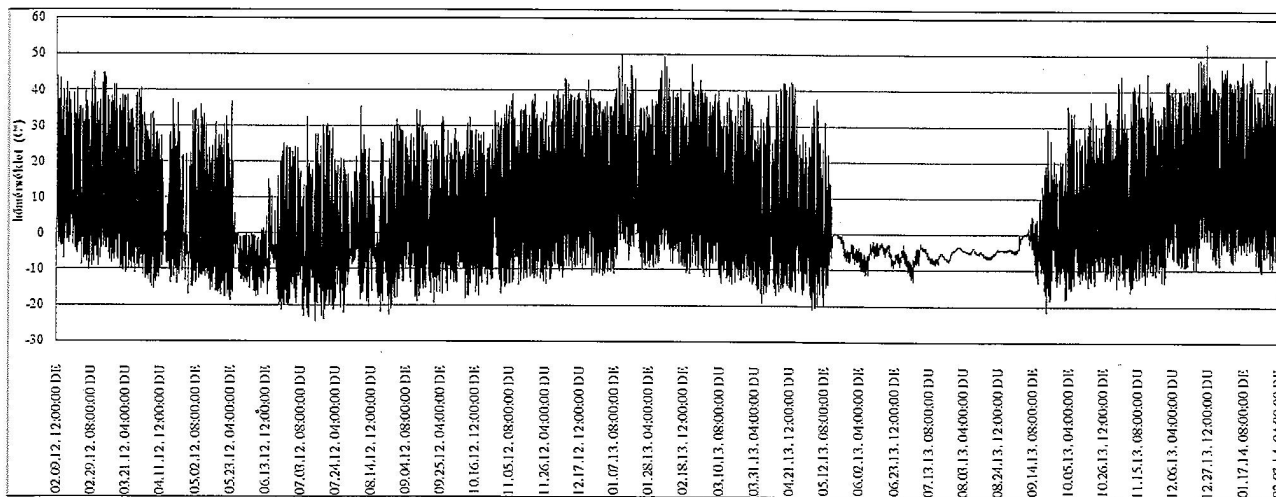
A regolit porozitásának, vízszállításának megállapítására fémcső-mintákat vettünk.

Az extrém környezet baktérium együtteseinek elemzéséhez 3800 és 6500 m között gyűjtöttünk nedves mintákat, melyeket hűtve tároltunk.

Eredmények

Az Ojos del Saladón mintegy 6000 méteres magasságig sivatagi környezetet találunk. Ennek leggyakoribb felszíntípusai (a széleróziós terepek, szélmarta sziklák és maradéktakarók mellett) a kősvatagos felszínek és a homokleples, ill. hullámfodrokkal borított területek.

Az igen erőteljes hóingás és rendkívüli fagyváltozékonyság okozta aprózódás mindent betemető törmelékkepződéshez vezet. A 4200 méteres adatgyűjtő helyünkön az egyik műszer két éven keresztül kősvatag-felszíni hőmérsékletet mért – közvetlen besugárzás alatt (2. ábra). Ebből megállapítható, hogy hóborítás nélkül kb. 330-340 nap fagyváltozékonnyá válik a felszín! A szélsőséges napi ingás eltűnése jelezte hóborítás viszont szélsőségesen alakul, mivel az első évben összesen mintegy 3-4 heti volt, míg a második évben összidőtartama elérte a 4 hónapot, a napi hóingás-érték pedig az 50 °C-t is meghaladta (téli is, amikor nappal akár 30 °C fölé melegedett a felszín, majd éjszaka -20 °C-ig is hűlhetett).



2. ábra. Felszíni hőmérsékletváltozás [2012.02.09 – 2014.02.07] 4200 m-en

Figure 2. Surface temperature at 4200 m asl. [02.09.2012 – 02.07.2014]

Ugyan gyakoriak a maradéktakarós kősvatagos felszínek is, de ahol van szemcseutánpótlás, ott az aprózódott felszíni törmelék a növényzettelen, száraz terepen jellemzően hullámfodrokba rendeződik (3. ábra). Ez elsősorban szelíd, hegylábi lejtők luv oldalán jellemző.

E hullámok 4000 m körül még nem különböznek jelentősen az átlagos ripple mark méretektől, az 5000 m fölötti legszeleesebb helyszíneken a Föld legnagyobbjai közé tartoznak (Milana 2009, Milana et al. 2010, de Silva 2010). Belső, rétegzett anyaguk döntően horzsakő és homokfrakciójú hordalék (4. ábra).

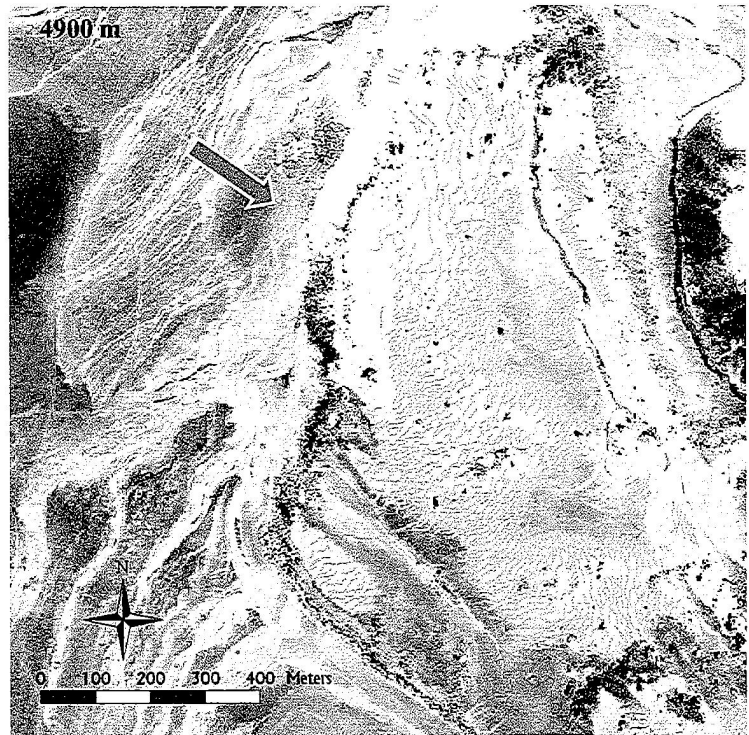
Az Argentínában 4400 m körül végzett kormeghatározások szerint akár 1500 évesek is lehetnek a felépült fodrok (Bridges et al. 2012). Az Ojos del Saladón mintegy 1000 méterrel magasabban fekvő területen azonban a legérdekesebb sajátosságuk a nagyszemcsés, nehéz üledékborítás. A gyakori, viharos szelek által könnyen szállítható horzsakő és homokszemcse méreten és súlyon túl itt a felaprózódott lávaközetek anyagát találjuk a hullámfodrokon (5. ábra).

E fedett hullámok már nem mozognak, a nagy és nehéz szemcsék konzerváló szerepűek. De hogyan kerülnek a hullámfodrokra? A hullámok kialakulására és a fedőréteg érkezésére is a felszíni törmelékkel kapcsolatban álló nedvesség, hó és jég jelenléte – vagy eltűnése – ad választ.

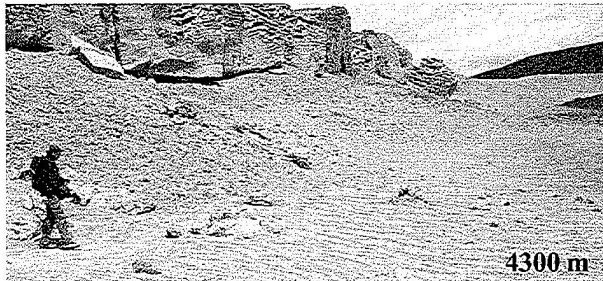
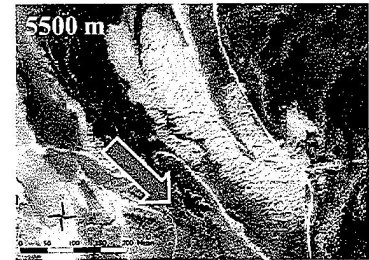
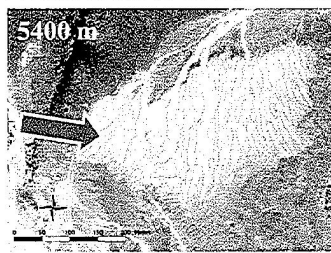
Az Ojos del Salado felszíni jégborítása napjainkra néhány apró, 100-méteres nagyságrendű holtjégfoltra zsugorodott (6. ábra).

3. ábra. Hullámfodrok az Ojos del Salado térségében, a nyilak a szélirányt jelzik

Figure 3. Ripple mark fields by the Ojos del Salado area (arrows show the wind direction)



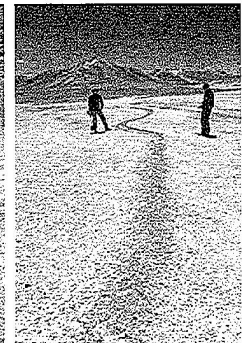
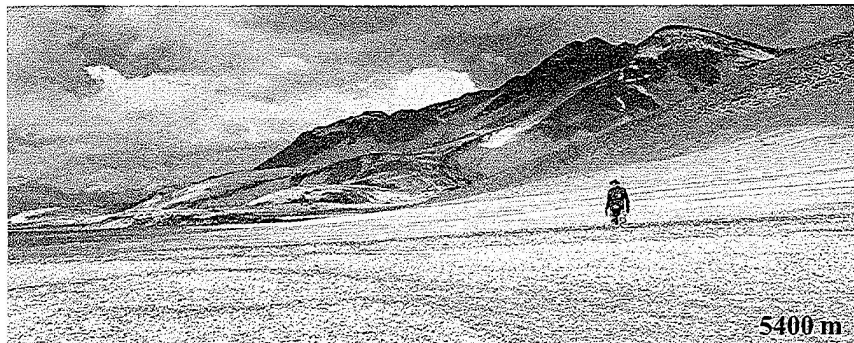
4. ábra. A jellemző hullámfodor méret-osztályok
Figure 4. The typical ripple mark dimensions

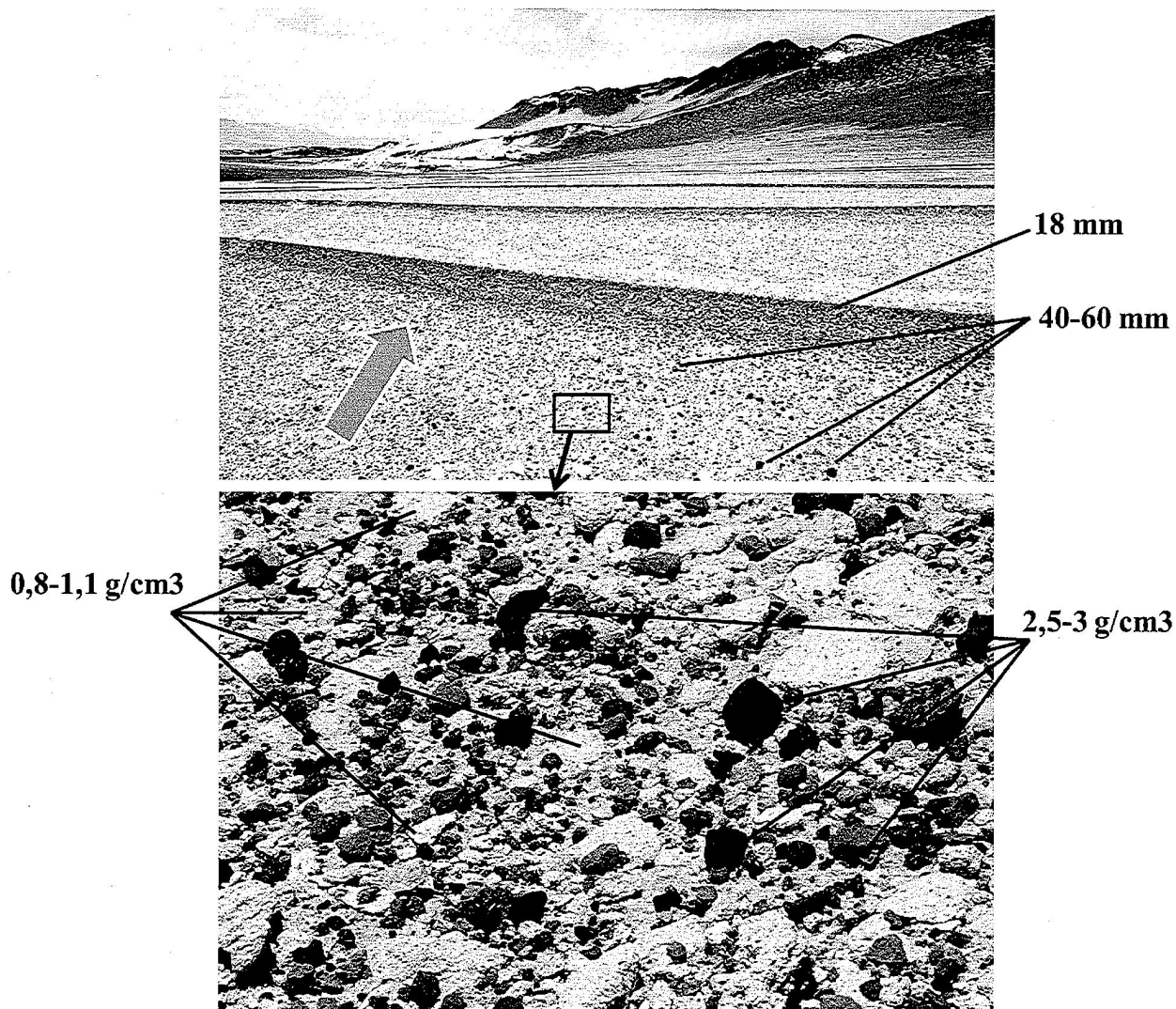


kisméretű fodrok
hullámhossz: 30-90 cm
amplitúdó: 2-5 cm

középméretű fodrok
hullámhossz: 3-12 m
amplitúdó: 20-50 cm

nagyméretű fodrok (óriásfodrok – megaripples, MR)
hullámhossz: 15-44 m
amplitúdó: 60-230 cm





5. ábra. Sötét, nehéz szemcsékkel fedett gerincű fodrok 5300 méteren

Figure 5. Dark, heavy weight sediment cover on the ripple marks at 5300 m asl

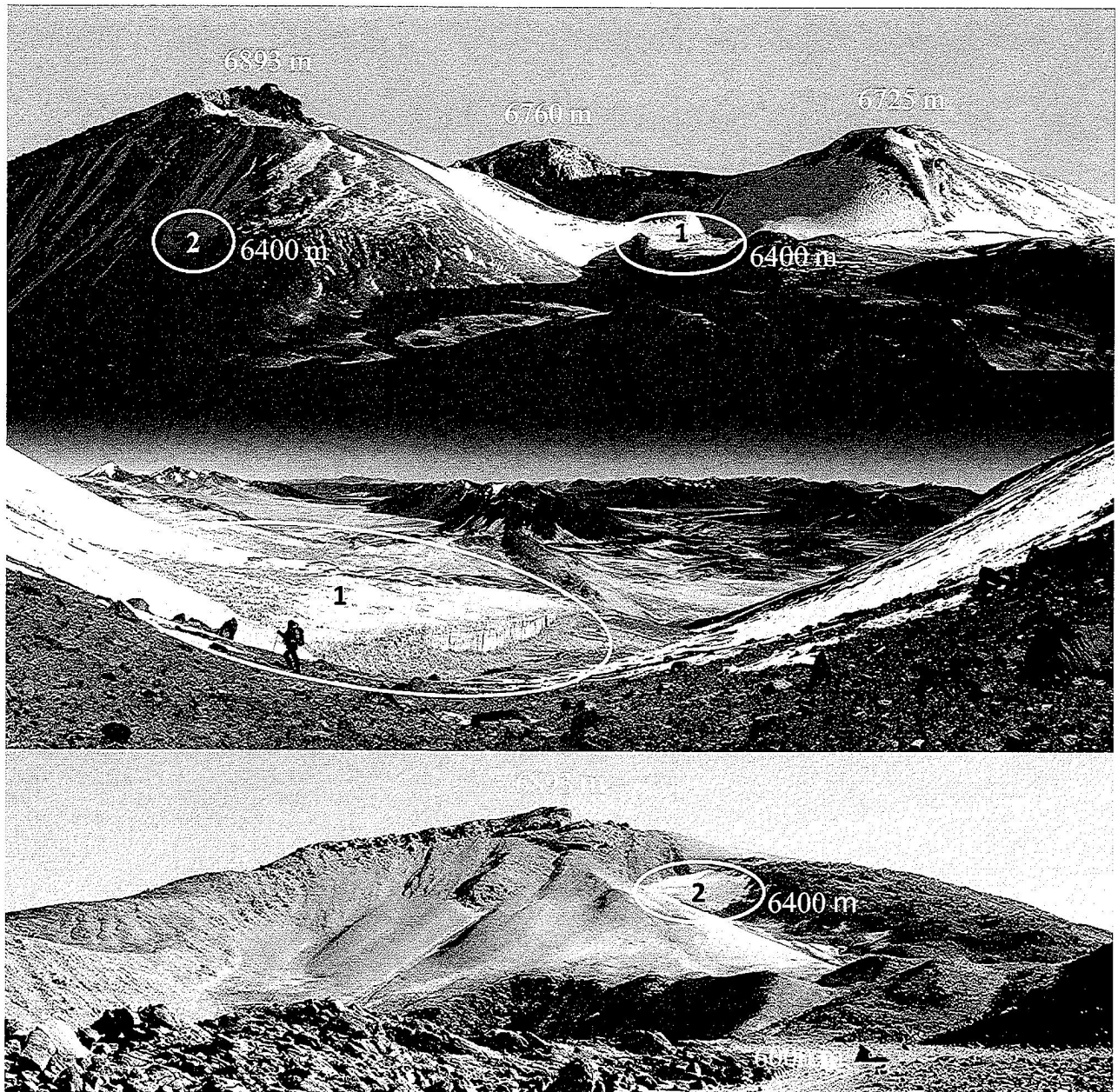
A hegyen kialakult egykori gleccserek maradványjege azonban törmelék alá temetve, lejtőtörmelékkel fedve és jégmagvú oldalmorénasáncok formájában (5000 és 6300 m között) a felszíni megjelenésénél nagyobb mértékben is jelen van ma még. A gleccserjég fogyását e száraz területen a törmelékkel való betemetődés – szigetelő jellegénél fogva – jelentősen késlelteti, ám napjainkban pont ezen eltemetett jég olvadása az egyik legdominánsabb folyamat.

Az oladás akkor gyorsul fel, amikor az eltemetett jégtömb a felszínre kerül: ez akkor valósul meg, ha az olvadékvizek (melyek szerepe ma egyre nő a növekvő oladás miatt) bevágódnak a völgytalpon, alámoszák a völgyoldalakat és a jeget fedő homok vagy épp horzsakő lecsúszik. E folyamat viszonylag rövid idő alatt megváltoztatja a völgy morfológiáját.

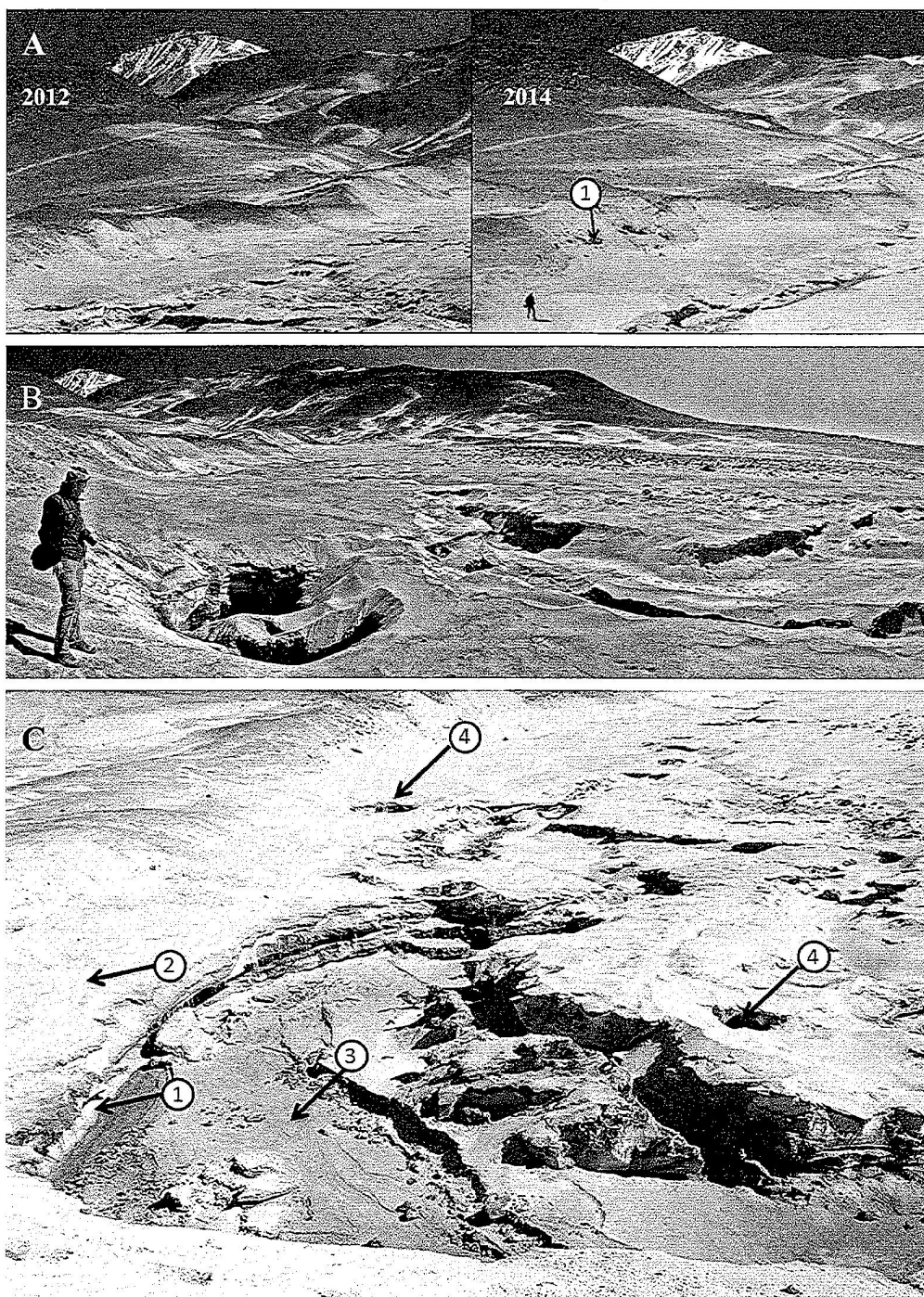
A holtjég-tömb olvadása ugyanakkor megindulhat az elvékonyodó homokréteg alatt is, aminek az lesz a felszíni következménye, hogy a homok tömörödik, kerekded, sekély mélyedések, a fedett karsztok szuffóziós, utánsüllyedésszerű töbreihez hasonló alakzatok jönnek létre (7. ábra).

A völgyet kitöltő jég alatt utat találó olvadékvíz jégalapi alagutat olvaszt. Ezekben a jég alulról olvadva tágíthatja az üreget, felharapódzik a fedőanyagig. Ha nagyméretű üreg alakul ki, akkor a fedő moréna, horzsaköves homok beszakad és a felszínen lyuk képződik. Kialakul a lezökkenésszerű, utánsüllyedésszerű pszeudotöbör (Eberhard and Sharples 2013).

A felszíni és az eltemetett gleccserjég oladásából származó víz mellett a permafroszt aktív rétegéből származó olvadékvíz is rendkívül jelentős. Ez az alapvetően szivárgó nedvesség a zárt mélyedésekben a felszínre kerül, így magashegyi (sekély) tavak képződnek. A tavak túlfolyásából viszont már patakok indulhatnak.



6. ábra. Gleccsermaradványok, holtjégfoltok az Ojos del Salado
Figure 6. Glacier-remnants, dead-ice bodies on the Ojos del Salado

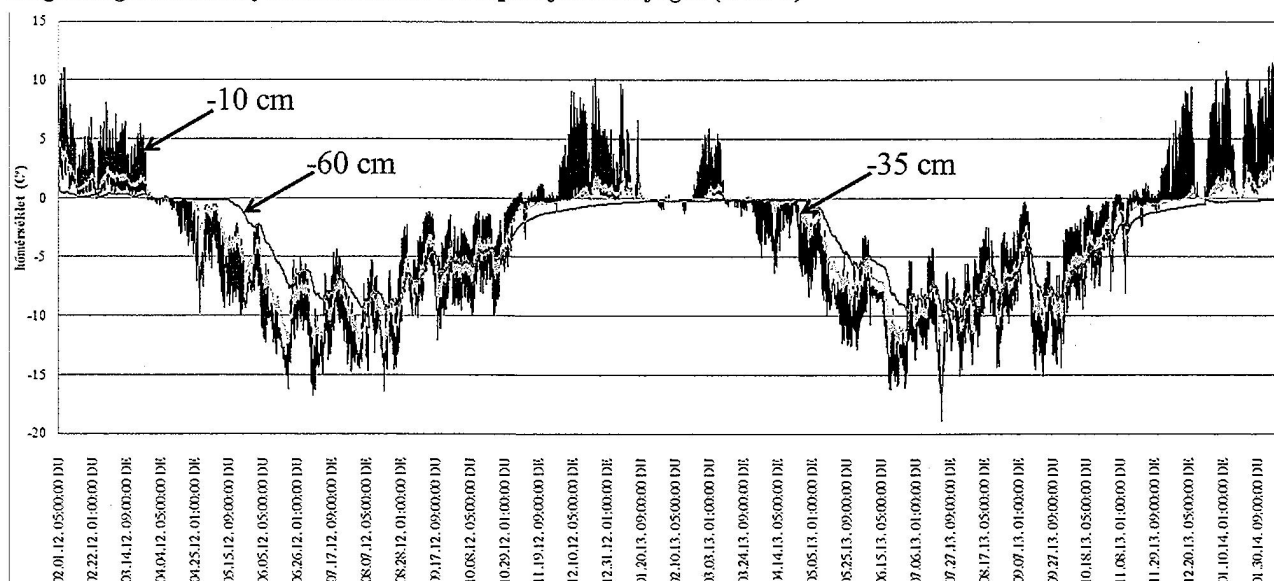


7. ábra. A: Egykori gleccservölgy oldalmorénái 5300 méteren, 1. kibukkanó holtjég, B: Lezökkenéses, utánsüllyedésses pszeudotöbör, C: 1. jég, 2. horzsakő és homokréteg, 3. olvadékvíz, 4. lezökkenésses pszeudotöbör

Figure 7. A: Lateral moraines of a former glacial valley at 5300 m asl, 1. Dead ice outcrop, B: Downcast fault subsidence pseudodoline, C: 1. ice, 2. pumice and sand layer, 3. meltwater, 4. downcast fault subsidence pseudodoline

A permafroszt olvadása, a jéggel rendelkező övezet magasabbra tolódása akkor vizsgálható, ha adataink vannak az aktív réteg hőmérsékletjárásáról, ill. a H₂O halmazállapot-változásairól. A geomorfológiailag legjellegzetesebb, reprezentatív magassági szinteken elhelyezett mérőállomásaink ezt a célt szolgálják. Így meghatározhattuk, hogy az Ojos del Salado csúcsán a 10 cm-nyi vastagságú törmelékben mért évi középhőmérséklet (8 cm-rel a felszín alatt) -17,4°C és a vizsgált 730 naphoz mindössze 18 napon fordult elő kevéssel fagypont fölötti hőmérséklet, 97 napon azonban -25 °C alá ment a regolit hőmérséklete. A gyakorlatilag állandóan fagyott kőzettörmelék ugyanakkor teljesen száraz, így laza, morzsolódó állagú.

Az alacsonyabb szinteken végzett mérések azonban kiválóan mutatták az aktív réteg hőmérsékletjárásán keresztül a fagyás-olvadás ciklusait, ami legfőképp a halmazállapotváltozások időszakainak meghatározása és az aktív réteg megvastagodásának nyomon követése szempontjából lényeges (8. ábra)



8. ábra. Az 5830 méteren létesített állomás aktív rétegében (10, 35 és 60 cm mélyen) mért hőmérsékletek (2012.02.01 – 2014.02.14)

Figure 8. Active layer temperatures [-10, -35 and -60 cm] at the 5830 m station (02.01.2012 – 02.14.2014)

A 60 cm-es mélységig megvastagodó aktív réteg fagyási-olvadási ciklusairól a napi periodicitás-elemzés nyújt képet. (9. ábra). A periódusok eltűnése a nagy energiát felemészítő halmazállapot-változások sajátossága. Míg a téli időszakokban a teljesen átfagyó aljzatban végig tapasztalható a napi hőmérsékleti ciklikusság, az olvadási időszakban mindez megszakad.

Ennek különlegessége, hogy a kiszáradó felszínközeli részek miatt a felső rétegek nyári újrafagyása – az alacsony külső hőmérsékletek ellenére is – viszonylag ritka jelenség. Ugyanakkor az aktív réteg alsó része felé haladva – a magasabb nedvességtartalom miatt – gyakrabban történik halmazállapot változás, 60 cm mélyen gyakorlatilag a nyári szezonban a víz-jég határán váltakozik a közetszemcsék közötti nedvességtartalom. Az aktív réteg ebben a magasságban 8 hónapon át (áprilistól decemberig) fagyott állapotú, évi középhőmérséklete – mélységtől függően – $-3,2$ – $-3,5$ °C. Az olvadási időszakot 4-5 igen hideg szakasz tagolja, ekkor a felső rétegek időleges újrafagyása is megindul. Huzamosabb, vastagabb nyári hótakaró jelenlétére nem utalnak az adatok.

E szintnek – a cementjég viszonylag hosszú, ám elnyúló olvadási szakasza és jelentős felolvadási mélysége miatt – igen jelentős szerepe van az alacsonyabb szintek vízellátásában: a legfontosabb felszín alatti vízforrásnak tekinthető.

Következtetések

A szunnyadó óriásvulkán jégtartalma – mint aktív vízbázis – jelentős átalakuláson megy keresztül, s e száraz területen a jégolvadás alapvetően meghatározza a felszínfejlődést, ennek pedig évtizedes távlatú környezeti hatásai lesznek.

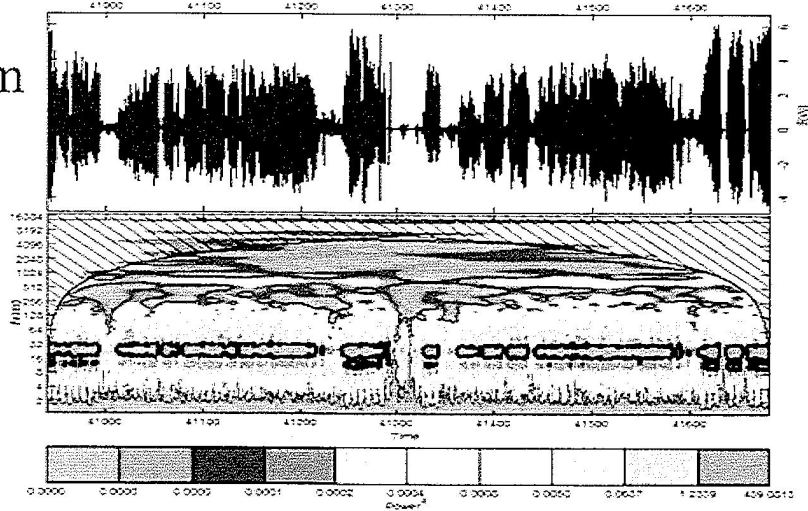
Az eolikus folyamatok hordalékszállítását ott a legerőteljesebb, ahol a felszíni rétegek hosszú időszakra engednek föl és száradnak ki, nyári újrafagyásuk pedig nem jellemző. Az 5300 m körüli szintben az aktív réteg évi középhőmérséklete $-0,3$ – $-0,48$ °C, amely fél éves, gyors ütemű felolvadást és aktív réteg mélyülést takar. A felszíni, felengedő és száraz üledéket könnyen megmozgatják a jellemzően igen erős, nyaranta méréseink szerint napi gyakorisággal 40-50 km/h-s szelek. Az erősebb viharok ugyanakkor háromszor ekkora szélességet is elérnek. A nyári, rendszeres havazások néhány nap alatt elszublimáló havának felszíne azonban megfagy (a nyári, éjszakai hőmérsékletek -8 – -10 °C-osak ebben a magasságban). A hullámfodrok hullámvölgyeibe betelepülő hó fagyott felszíne jelenti a csúszópályát ilyenkor a nagy sűrűségű kőzetdarabok számára, melyek ekkor hullámhegytől hullámhegyig csúszhatnak a széllekeések révén. A könnyen kialakuló és elterjedt horzszakó, ill. homokfodrokra (Thomas 2011), így mozgást gátló, de egyben konzerváló hordalékréteg települ.

A jég- és firnmaradványokat már betakart homokleplek aktív nyári mozgásban vannak, de az olvadási folyamatok ma jelentéktelenül átalakítják felszínüket – a jégre települt morénaanyaggal együtt. Szuffúziós alakzatok, olvadásformák és olvadákvíz-erodálta felszínek jönnek létre éves skálán is kirajzolódó sebességgel.

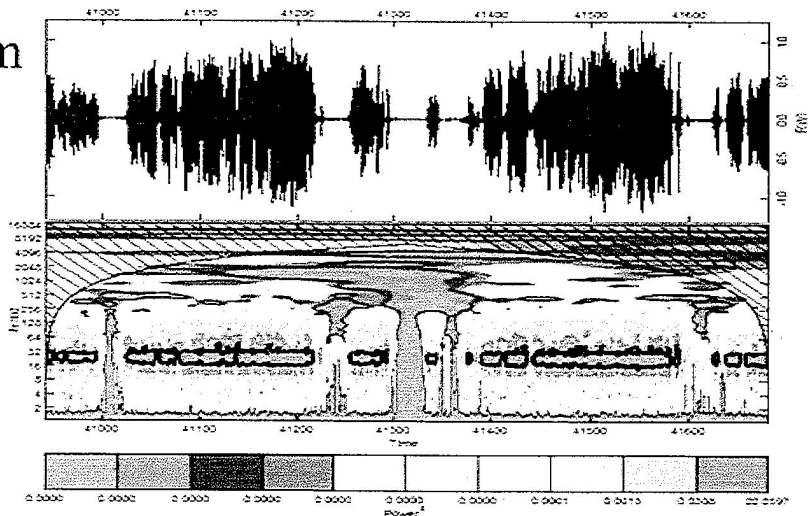
9. ábra. Az 5830 m-en fekvő állomás aktív rétegében (10, 35 és 60 cm mélyen) mért hőmérsékletjárás periodicitása (a periodicitás meglétét minden mélységnél az alsó diagramrészek központi, vastag sávja jelzi)

Figure 9. Active layer temperature periodicity [-10, -35 and -60 cm] at the 5830 m station (the thick horizontal line shows the existence of periodicity)

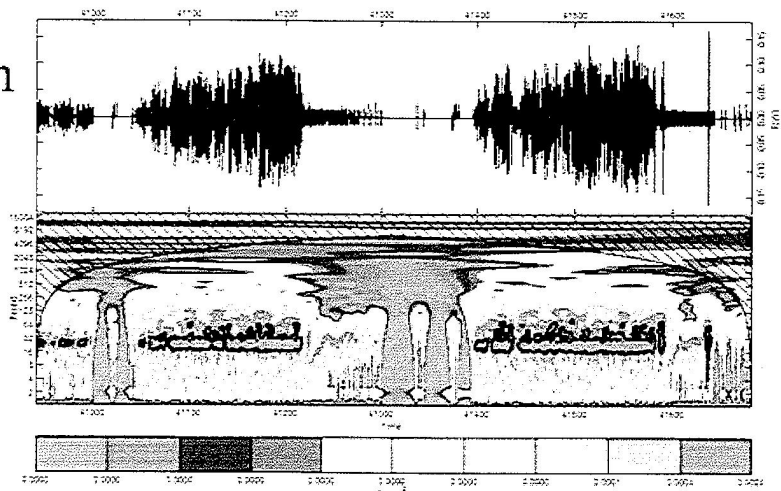
10 cm



35 cm



60 cm

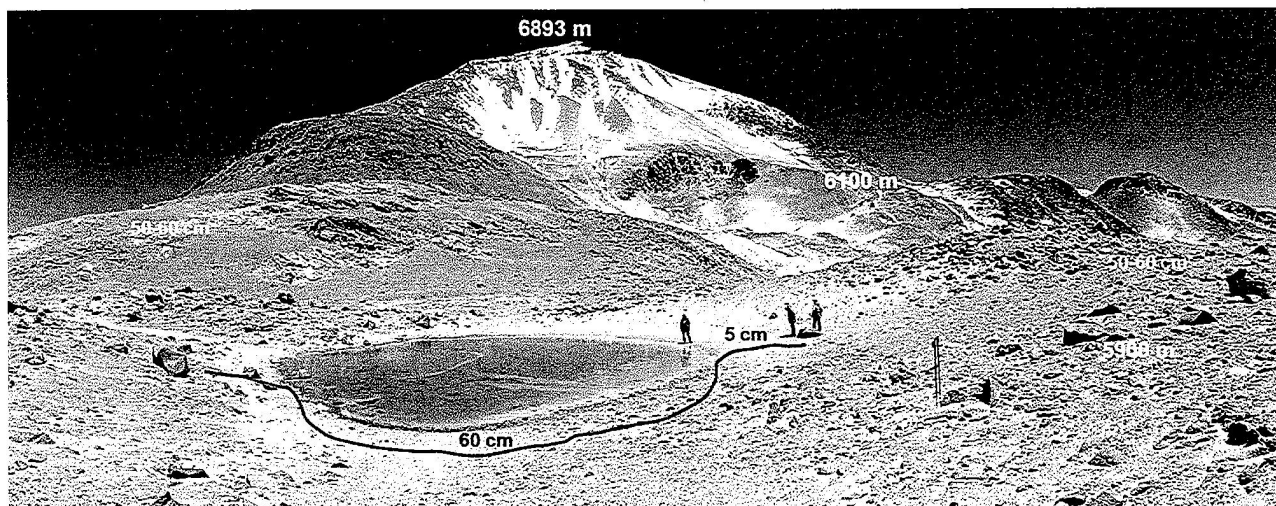


Az eltemetett jég mai degradációja különösen figyelemre méltó: az olvadékvíz mennyiségének növekedése figyelhető meg. A jégolvadás rövid távon növeli a felszíni és felszín alatti vízáramlás mennyiségét, néhány évtizedes távlatban azonban a regolitban jégcementként megjelenő jég elfogyása várható, ami drasztikus kiszáradáshoz vezet. Az olvadékvíz legfontosabb forrásterülete az 5800-6000 méteres övezet: az aktív réteg felengedése elnyújtott folyamat, a jégcement olvadása egész nyáron szivárgó nedvességgel táplálja a lejtők felengedő regolitrétegének alját. Ebben a szintben az aktív réteg megvastagodása jellemzően 50-60 cm-es mélységig terjed, a szivárgó víz a medenceterületeken tavakat hoz létre (10. ábra), s az erős besugárzás hatására e sekély (1 méternél ritkán mélyebb) állóvizek nyáron akár 9 °C-ra felmelegednek, miközben a levegő nappali hőmérséklete árnyékban itt ugyanekkor

fagyponthoz közeli. A tavak hóátadása tovább csökkenti alattuk a permafroszt mennyiségét, jelentős méretű talikokat létrehozva.

Az aktív réteg kiszáradó felszínközeli része miatt a periglaciális lejtős tömegmozgások jelenléte alárendelt.

A besugárzás növekedésével, a felszín erőteljesebb felmelegedésével az aktív réteg további vastagodása, hosszabb távon pedig a permafroszt degradációja következik be. Ez nyaranta egyelőre növekvő lefolyást okoz, de a permafroszt felszakadozásával, az övezet magasabbra szorulásával és zsugorodásával néhány évtizedes távlatban ebben a tekintetben is szárazodás várható.



10. ábra. Permafroszt eredetű olvadékvízből táplálkozó tó 5900 méteren az aktív réteg maximális nyári vastagságával

Figure 10. Permafrost based meltwater lake at 5900 m asl., with the maximum active layer thickness

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
- Clapperton C.M. 1994: The Quaternary glaciation of Chile - Revista Chilena de Historia Natural, 67:369-383
- de Silva, S.L. (2010): Largest wind ripples on Earth? Comment - Geology, 38, 218.
- Eberhard, R., Sharples, C. 2013: Appropriate terminology for karst-like phenomena: the problem with 'pseudokarst' - International Journal of Speleology 42. (2) 109-113.
- 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. 59-70.
- Karátson, 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
- Messerli, B., Grosjean, M., Mathias Vuille, M. 1997: Water availability, protected areas, and natural resources in the Andean desert Altipano - Mountain Research and Development, vol. 17, No.3, 229-238
- Milana, J.P. 2009: Largest wind ripples on Earth? - Geology, 37, 343-346.
- Milana, J.P., Forman, S. and Kröhling, D. 2010: Largest wind ripples on Earth? Reply - Geology, 38, 219-220.
- Moreno, T., Gibbons, W. (2007): The Geology of Chile - Geological Society of London, 414.
- 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, 47-59.
- Thomas, D. S. G. 2011: Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands - John Wiley & Sons, 648