

Vpliv visoke nadmorske višine na človeka in prilagoditve nanjo

Tomaž Goslar, Irena Mrak

1 Uvod

Visokogorska območja so zaradi manjše vsebnosti kisika v zraku, nizkih temperatur in močnega sončnega obsevanja človeku negostoljubno okolje. Kljub vsem človeku nenaklonjenim dejavnikom okolja pa so nekatera visokogorska območja stalno poseljena že mnogo let: Etiopsko višavje vsaj 70.000 let, Tibetanska planota vsaj 25.000 let in Andsko višavje vsaj 12.000 let. V tisočletjih stalne poselitve visokogorskih območji so tam živeči prebivalci razvili edinstvene genetske in fiziološke prilagoditve negostoljubnemu okolju (Goslar, 2017; Simonson, 2015). Vsi tisti, ki v visokogorska območja zahajamo le občasno, pa se vsakič znova srečamo z nevšečnostmi, ki jih prinaša višina.

2 Vpliv nadmorske višine na delovanje človeškega telesa

Večina težav, ki se pojavijo na visoki nadmorski višini, je posledica nižjega parcialnega tlaka kisika v atmosferi, kar je posledica nižanja barometričnega tlaka z naraščajočo višino. Barometrični tlak se z višjo nadmorsko višino znižuje približno eksponentno. Čeprav je delež kisika v atmosferi na različnih višinah konstanten, se z višjo nadmorsko višino in posledično nižjim barometričnim tlakom nižajo tudi parcialni tlaki posameznih plinov v atmosferi, kar pomeni manjšo gostoto oziroma razpoložljivost kisika. To se v organizmu kaže kot pomanjkanje kisika oziroma hipoksija. Na višini Mount Everesta je v primerjavi z morsko gladino na razpolago le še 28 % kisika. Pomanjkanje kisika vodi v upočasnjeno delovanje celic in organov in upočasnjuje regeneracijo. Nad določeno nadmorsko višino tako telo zaradi pomanjkanja kisika ne zmore več zadostiti energetskim potrebam in začne propadati (Milledge, West, Schoene, 2007).

Poleg manjše razpoložljivosti kisika z višino upada tudi temperatura, ki se na vsakih 150 m nadmorske višine zniža za približno 1 °C. Z močnim vetrom, ki je pogost na visokih nadmorskih višinah, je občutek mraza še hujši in hitro lahko pride do ozeblin ali omrzlin. Zmanjšuje se tudi absolutna vlažnost – količina vodne pare v volumnu zraka ob določeni temperaturi, kar povzroča povečano izgubo vode z dihanjem in lahko hitro vodi v dehidracijo. Zaradi manjše gostote zraka na višjih nadmorskih višinah se povečuje tudi sončno sevanje, ki je na višini 4000 m za 100 % večje kot na morsk

gladini. Sončno sevanje je še močnejše zaradi odboja s snega, ki lahko odbije tudi do 90 % sončnega sevanja. Večja je tudi izpostavljenost ionizirajočemu sevanju iz vesolja (Milledge, West, Schoene, 2007).

Hiter vzpon na višino preko 2000–2500 m pri neaklimatiziranih, a sicer zdravih ljudeh lahko povzroči akutno višinsko bolezen. Težave se pojavijo v prvih 24 urah po prihodu na višino, lahko pa že v nekaj urah po vzponu. Kažejo se kot glavobol, slabost, bruhanje, slabši apetit, slabo počutje in nespečnost. Ob počitku in prenehanju vzpenjanja težave brez zdravljenja običajno same izzvenijo v petih dneh. Hujši, življenjsko ogrožajoči obliki višinske bolezni sta višinski možganski edem in višinski pljučni edem. O akutnem možganskem edemu govorimo, ko akutna višinska bolezen napreduje z glavobolom, oslabelostjo, moteno koordinacijo, izgubo zavesti, komo in smrtjo. Višinski pljučni edem se lahko v nekaj urah razvije iz akutne višinske bolezni z vse težjim dihanjem, sprva suhim, kasneje pa produktivnim kašljem s penasto krvavkastim izmečkom in lahko v kratkem povzroči zadušitev ter smrt. Napredovanje tako višinskega možganskega edema kot višinskega pljučnega edema lahko upočasnimo z zdravlili, ključen za ozdravitev pa je spust na nižjo nadmorsko višino (Milledge, West, Schoene, 2007).

Akutno višinsko bolezen relativno dobro poznamo, razumemo mehanizme, ki do nje pripeljejo in jo znamo zdraviti. Slabo pa razumemo postopno propadanje organizma ob dolgotrajnem bivanju na visoki nadmorski višini. Postopno propadanje organizma ob dolgotrajni izpostavljenosti visoki nadmorski višini se prične med 5000 in 6000 m in je posledica hipoksije, mraza, dehidracije, stradanja in izčrpanosti. Z višino povzročeno propadanje organizma se pokaže kot: postopna izguba telesne teže, slabši apetit, počasnejša regeneracija, razdražljivost, pomanjkanje volje ... Upočasnijo se miselni procesi, zmanjšajo kognitivne sposobnosti in zniža arterijski tlak. Ob dolgotrajni izpostavljenosti visoki nadmorski višini bi tako kljub ustrezni aklimatizaciji prišlo do smrti organizma, saj se zaradi hipoksije in posledičnega pomanjkanja energije telo ne more obnavljati in hira.

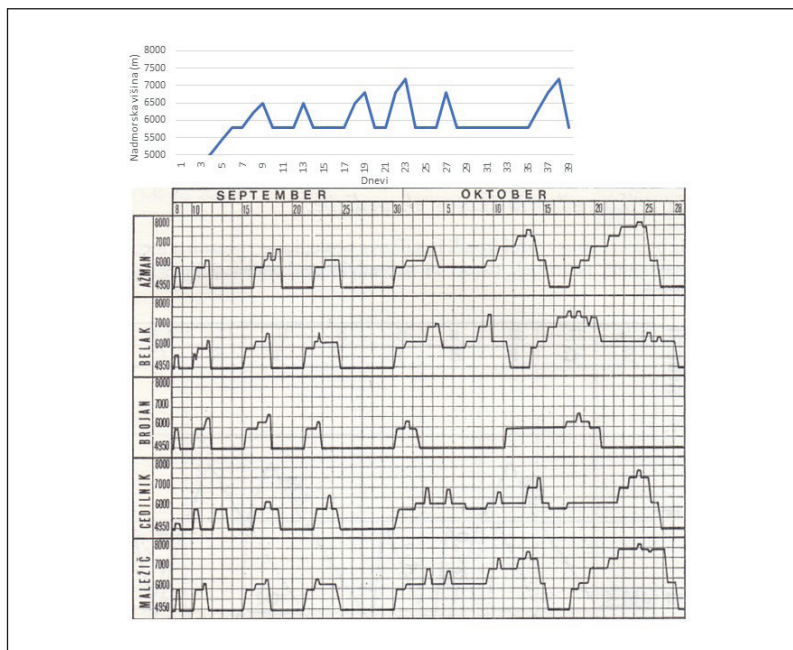
Kljub vse večjemu poznavanju vplivov visoke nadmorske višine na človeka in razumevanju delovanja organizma v okolju z nižjo razpoložljivostjo kisika še zdaleč ne vemo vsega. Predvsem slabo razumemo dolgotrajno bivanje na zelo visokih nadmorskih višinah.

Kljub temu, da na visoki nadmorski višini nad 2500 m stalno živi kar 63 milijonov ljudi (Goslar, 2017) in da obisk visokogorja narašča, je naše razumevanje vpliva visoke nadmorske višine na človeka in z višino povezanih bolezenskih procesov precej omejeno. Izvajanje raziskav je zaradi slabše dostopnosti, negostoljubnega okolja in pomanjkanja finančnega interesa težavno, vendar izjemno pomembno, če želimo izboljšati varnost obiskovalcev in tistih, ki stalno živijo na visoki nadmorski višini. Ker so visokogorska območja večinoma v revnejših državah, je interesa in finančne podpore tovrstnim raziskavam malo. Ravno zaradi tega so vsakršne raziskave življenja človeka na višini dobrodošle, pa tudi če so narejene na manjšem vzorcu preiskovancev. Alpinisti, ki zahajamo v ekstremne višine, lahko z medicinskimi raziskavami najbolj pripomoremo k boljšemu poznavanju vpliva višine na človeka in v prihodnje izboljšamo tudi lastno varnost.

3 Zdravstvene težave slovenskih odprav na Makalu

Člani odprave na Makalu leta 1972 so imeli kar nekaj težav z višinsko boleznijo in omrzlinami, vendar se je k sreči za udeležence odprave vse dobro končalo (Kunaver in sod., 1974). Zaradi bolezni ene izmed udeleženk pa se je skoraj tragično končala alpinistična raziskovalna odprava na Makalu jeseni 2014. Bolezen je bila najverjetneje posledica ravno dolgotrajnega bivanja na visoki nadmorski višini (več kot 35 dni nad 5800 m) (Slika 1), ekstremnega vremena s temperaturo pod $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ter močnim vetrom in velikih naporov (Slika 2). Zdravstvene težave so se pričele 47. dan odprave, dan po sestopu v bazni tabor (5700 m). Alpinistko je zbudilo hitro in globoko dihanje ter občutek pomanjkanja zraka. Težave so se v naslednjih urah hitro stopnjevale z bledenjem vida in postopno izgubo zavesti. Na srečo je bilo na območju Makaluja lepo vreme in v bližini helikoptera, ki je alpinistko v uri po klicu že odpeljal do najbližje zdravstvene postaje v Lukli (2860 m), kamor je prispela pet ur po pričetku težav. V Lukli so se po 20 minutah začetnega zdravljenja (diuretik, kortikosteroid, antibiotik in kisik) odločili za premestitev v bolnišnico v Katmanduju (1400 m). Ob prihodu v bolnišnico je bila nezavestna in neodzivna, s širokimi in nereaktivnimi zenicami, podhlajena s frekvenco srca 45 utripov na minuto in frekvenco dihanja 28 vdihov na minuto. Ker ob prihodu v bolnišnico niso tipali pulzov, so pričeli z zunanjo masažo srca, ki je trajala 10 minut.

Slika 1: Primerjava profila vzpona na Makalu odprave leta 2014 in nekaterih članov odprave leta 1972. (Vir: Avtorja raziskave, 2014; Kunaver in sod., 1974).





Slika 2:

Vzpon proti drugemu višinskemu taboru na višini 7100 m z več kot 20 kilogramov opreme (Foto I. Mrak, 2014).

Sprejemni izvidi so bili komaj še združljivi z življenjem: pH 6,71 (7,37–7,45), $p\text{CO}_2$ 4,1 kPa (4,3–5,7), HCO_3 3,7 mmol/l (21–26), $p\text{O}_2$ 56,4 kPa (9,5–13,9), laktat 9 mmol/l (0,5–2,2). Po krajšem oživljanju je prejela infuzijo tekočine, vazoaktivna zdravila, bikarbonatant, antibiotike, kortikosteroide in vitamine. Po začetnem zdravljenju se je stanje pričelo hitro popravljati, s povrnitvijo zavesti v osmih urah po prihodu v bolnišnico. Kljub normalizaciji stanja pa je ostala okvara vida, ki se je v naslednjih dneh stopnjevala prek izgube barvnega vida do skoraj popolne slepote. Kasneje opravljene preiskave niso pokazale znakov možganskega edema ali krvavitev v mrežnico, ki sta značilna za višinsko bolezen. Ugotovljena je bila le okvara centralnih vlaken optičnega živca, ki jih običajno vidimo ob pomanjkanju kisika. Vid se je sicer sčasoma delno popravil, ostala pa je trajna okvara predvsem centralnega vida. Bolezen na drugih organskih sistemih ni pustila posledic (Mashkovskiy in sod., 2016).

Kljub obširnimi opravljenim preiskavam z današnjim poznavanjem delovanja človeškega telesa na visoki nadmorski višini primera ne moremo povsem pojasniti. Vsekakor je k bolezni pripomoglo dolgotrajno bivanje na visokih nadmorskih višinah in v ekstremnih vremenskih razmerah, ni pa šlo za klasično višinsko bolezen, saj so se težave pojavile ob spustu in ob evakuaciji na nižjo nadmorsko višino niso takoj izzvenele. Popolno sesutje presnove organizma, kot v opisanem primeru, bi lahko bilo posledica pomanjkanja vitaminov, o presnovi katerih, na visoki nadmorski višini, ne vemo veliko.

Podobnega primera v dostopni literaturi še niso opisali, kljub temu, da vsako leto lahko zasledimo več novic o alpinistih, katerih zdravstveno stanje se je ob sestopu hitro poslabšalo s težkim dihanjem in izgubo vida (IANS, 2016; Tapper, 2018; Guzman, 2021). Okvaro vida napačno pripišejo snežni slepoti, težko dihanje višinskemu pljučnemu edemu in višinski bolezni. V večini primerov zaradi pozne prepoznave resnosti

zdravstvenega stanja, slabih vremenskih razmer in visoke nadmorske višine ni časa ali možnosti za pravočasno evakuacijo. Možno je, da gre za še ne prepoznani medicinski fenomen ali obliko višinske bolezni.

4 Medicinske raziskave slovenskih odprav na Makalu

Ker v visokogorje zahaja vedno več ljudi, so medicinske raziskave vpliva visoke nadmorske višine na delovanje človeškega organizma še toliko bolj pomembne, raziskave pa zaradi oteženega dostopa, ekstremnih vremenskih razmer in omejenega števila prostovoljcev zahtevne in redke.

Pogosto so tudi zdravniki slovenskih odprav v Himalajo s skromnimi razpoložljivimi sredstvi raziskovali vpliv nadmorske višine na človeka. Že na odpravi leta 1972 je zdravnik odprave Borut Pirc opravil meritve krvnega tlaka, srčnega utripa in čas zadrževanja sape ter rezultate alpinistov primerjal z domačini – šerpami, ki so se skozi generacije odlično prilagodili višini. Meritve je večkrat ponovil in ugotavljal, kako se rezultati z aklimatizacijo spreminjajo. V prvem tednu po prihodu v bazni tabor je med alpinisti izmeril povprečno frekvenco 88,6 utripa srca na minuto in krvni tlak 145/95 mm Hg, na višjo nadmorsko višino prilagojeni domačini pa so imeli povprečno frekvenco nižjo (77,4 utripa na minuto) in prav tako krvni tlak (105/75 mm Hg). Znanstveni del odprave, po predvidevanju zdravnika Pirca fizično slabše pripravljen, pa je imel najvišjo frekvenco srca 99,8 utripa na minuto in v povprečju ustrezno višji krvni tlak 155/105 mm Hg. Po dvotedenski aklimatizaciji sta tako srčna frekvenca kot krvni tlak alpinistov postopno upadla na 82,6 utripa na minuto in 130/95 mm Hg (Kunaver in sod., 1974).

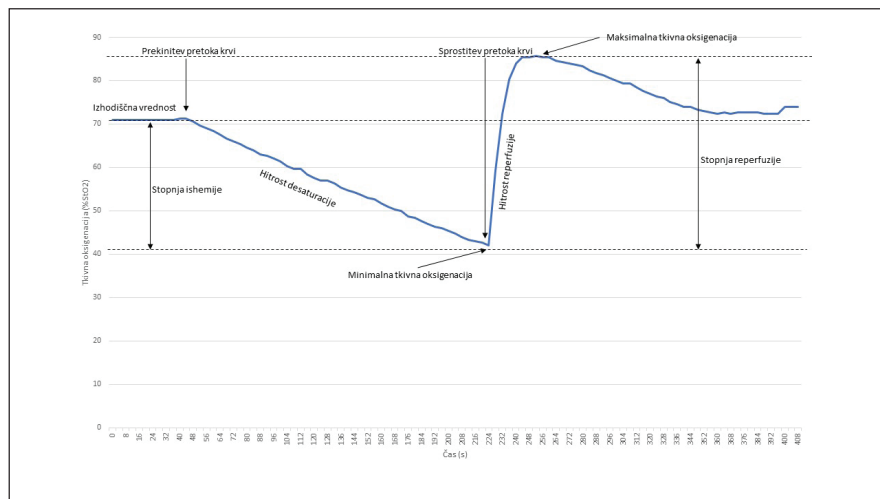
Tudi na odpravi leta 2014 smo pristopili k medicinskim raziskavam. Poleg snemanja visokoločljivostnih elektrokardiogramov – spremljanja električne aktivnosti srca (Slika 3) – smo spremljali spremembe porabe kisika, regeneracijo in prekrvavitve skeletnih mišic z metodo bližnje infrardeče spektroskopije med prekinitvijo prekrvavitve (Slika 4). Z bližnjo infrardečo spektroskopijo lahko izmerimo količino kisika v skeletni mišici, izračunamo hitrost porabe kisika, hitrost regeneracije zaloga kisika in reaktivnost (avto regulacijo) žilja (Slika 5). Meritev tkivne oksigenacije s prekinitvijo prekrvavitve traja približno pet minut. Na kožo podlakti in dlan se namesti senzor, ki v globini približno 2 centimetrov izmeri delež zasičenosti hemoglobina s kisikom. Z napihovanjem manšete, nameščene na nadlaket, začasno prekinemo pretok krvi preko mišic roke za obdobje treh minut in spremljamo hitrost porabe kisika in regeneracijo ob ponovni vzpostavitvi prekrvavitve.



Slika 3:

Snemanje visokoločljivostnega elektrokardiograma na odpravi na Makalu leta 2014 v višinskem taboru 2 na nadmorski višini 7100 m (Foto I. Mrak, 2014)

Slika 4: Primer posnetka tkivne oksigenacije (StO_2) skeletne mišice z bližnjo-infrardečo spektroskopijo med prekinitvijo pretoka krvi članov odprave Makalu 2014



Legenda: Izhodiščna vrednost – vsebnost kisika v skeletni mišici v mirovanju; Prekinitvev pretoka krvi – trenutek, ko se napihne manšeta, nameščena na nadlaket do pritiska 200 mm Hg in prekine pretok krvi v mišice roke; Hitrost desaturacije – naklon krivulje je odvisen od hitrost porabe kisika v skeletni mišici ob prekinjenem pretoku krvi in odraža presnovno zdravje skeletne mišice; Sprostitev pretoka krvi – trenutek sprostitve manšete na nadlakti in ponovna vzpostavitev pretoka krvi skozi mišice roke; Hitrost reperfuzije – naklon krivulje odraža odzivnost in zdravje mikrocirkulacije; Stopnja reperfuzije – odraža rezervo ožilja (Gerovasili in sod., 2010; Rogers, Banks, Jenkins, 2022).

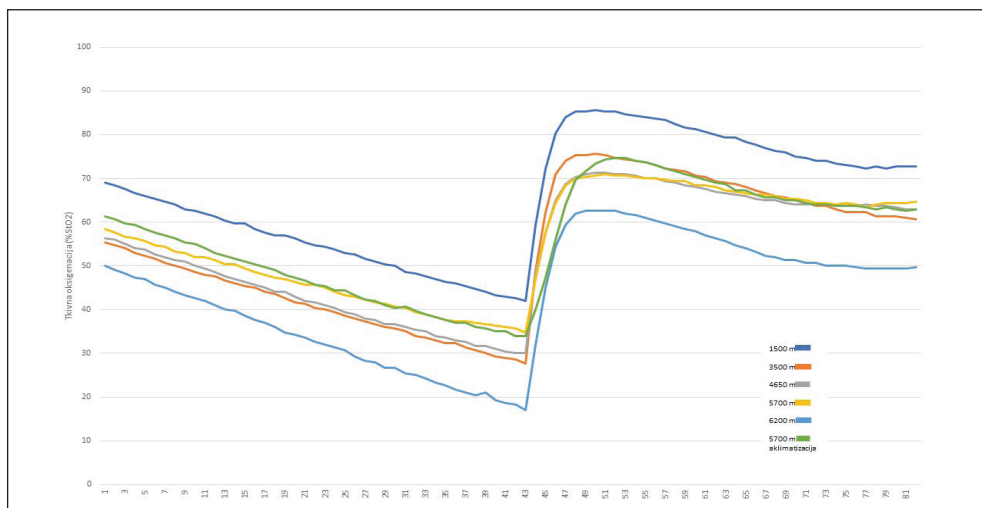
Slika 5:

*Izvajanje meritev
tkivne oksigenacije
s pomočjo
bližnje-infrardeče
spektroskopije
(Foto I. Mrak, 2014)*



Kot večina raziskovalcev vpliva visoke nadmorske višine na človeka smo se tudi mi srečali z glavno težavo takih raziskav – majhen vzorec le treh preiskovancev, kar otežuje interpretacijo rezultatov. V trenutno dostopni objavljeni literaturi so bile meritve tkivne oksigenacije dotlej opravljene na višini 5600 m. Najvišja višina naših meritev je bila 6200 m. Kljub majhnemu številu meritev lahko potrdimo doslej znane ugotovitve (Martin in sod., 2013), da visoka nadmorska višina in aklimatizacija ne vplivata na hitrost porabe kisika v skeletni mišici, kar je razvidno iz enakomerne hitrosti desaturacije ne glede na doseženo nadmorsko višino ali čas bivanja na višini. Še bolj kot v preteklih raziskavah pa smo zaznali slabšanje odzivnosti in avtoregulacijskih mehanizmov ožilja na višjih nadmorskih višinah in ob daljši izpostavljenosti višini, kar je razvidno iz nižje hitrosti reperfuzije ob daljšem bivanju na višini (Slika 6).

Slika 6: Povprečne vrednosti tkivne oksigenacije med testom okluzije žilja, opravljene na različnih nadmorskih višinah in ob različnem trajanju aklimatizacije enega od članov odprave Makalu 2014.



5 Sklep

Visoka nadmorska višina, z manjšo razpoložljivostjo kisika, močnejšim sončnim obsevanjem in nižjimi temperaturami predstavlja pomembno omejitev za človekovo delovanje in življenje. Zdravstvene težave, ki nastopijo ob izpostavljenosti visoki nadmorski višini, imenujemo višinska bolezen.

Tudi slovenske alpinistično-raziskovalne odprave na Makalu so se srečale z zdravstvenimi težavami. Na odpravi leta 2014 je prišlo celo doslej neopisane oblike višinske bolezni, ki je z dosedanjim razumevanjem vpliva višine na človeka ne znamo povsem pojasniti.

Zaradi slabega poznavanja vplivov visoke nadmorske višine na človeka so medicinske raziskave pomemben del alpinističnih odprav v visokogorje. Pri tem smo v okviru možnosti sodelovali tudi slovenski raziskovalci in alpinisti.

Literatura in viri

Gerovasili, V., Dimopoulos, S., Tzani, G., Anastasiou-Nana, M., Nanas, S., 2010. Utilizing the vascular occlusion technique with NIRS technology. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40, 2, str. 218-222. DOI: 10.1016/j.ergon.2009.02.004.

Goslar, T., 2017. Stalna poselitev na veliki nadmorski višini. *Geografski Obzornik*, 64, 3/4, str. 48–52.

- Guzman, J. 2021. American climber is one of two who have died on Mount Everest after snow blindness, exhaustion. *Changing America*. URL: <https://thehill.com/changing-america/well-being/553396-american-climber-is-one-of-two-who-have-died-on-mount-everest/> (citirano 16. 4. 2023)
- IANS (Indio-Asian news service). 2016. Indian climber Rajib Bhattacharya dies while descending Nepal peak. *The Indian express*. URL: <https://indianexpress.com/article/india/india-news-india/indian-climber-rajib-bhattacharya-while-descending-mount-dhaulagiri-in-nepal-2810286/> (citirano 16. 4. 2023).
- Kunaver, A., Cedilnik, D., Belak, S., Maležič, M., Jerin, Z., Kunaver, J. 1974. *Makalu*. Mladinska knjiga.
- Martin, D. S., Levett, D. Z. H., Bezemer, R., Montgomery, H. E., Grocott, M. P. W., 2013. The use of skeletal muscle near infrared spectroscopy and a vascular occlusion test at high altitude. *High Altitude Medicine and Biology*, 14, 3, str. 256–262. DOI: 10.1089/ham.2012.1109.
- Mashkovskiy, E., Szawarski, P., Ryzhkov, P., Goslar, T., Mrak, I., 2016. Fulminant high altitude blindness. *Journal of Travel Medicine*, 23, 6. DOI: 10.1093/jtm/taw057.
- Milledge, J., West, J., Schoene, R., 2007. *High Altitude Medicine and Physiology. Wilderness & Environmental Medicine* (4. izdaja). London: CRC Press. DOI: 10.1201/b13371.
- Rogers, E. M., Banks, N. F., Jenkins, N. D. M., 2022. Metabolic and microvascular function assessed using near-infrared spectroscopy with vascular occlusion in women: age differences and reliability. *Experimental Physiology*, 108, 1, str. 123–134. DOI: 10.1113/EP090540.
- Simonson, T. S., 2015. Altitude Adaptation: A Glimpse Through Various Lenses. *High Altitude Medicine & Biology*, 16, 2, str. 125–137. DOI: 10.1089/ham.2015.0033.
- Tapper, J. 2018. French mountaineer rescued from Pakistan's »Killer Mountain«. *The Guardian*. URL: <https://www.theguardian.com/world/2018/jan/28/nanga-parbat-climbers-rescue-french-woman> (citirano 16. 4. 2023).