

FIZIOLOGIJA BREZ MEJA

DELOVANJE ORGANIZMOV V EKSTREMNIH OKOLJIH

IZOBRAŽEVALNA DELAVNICA

PROGRAM IN KNJIGA IZVLEČKOV

Fiziologija brez meja: Delovanje organizmov v ekstremnih okoljih
Slovensko fiziološko društvo

PROGRAM IN KNJIGA IZVLEČKOV

24. 09. 2025

Univerza v Ljubljani, Medicinska fakulteta, Korytkova ulica 2, 1000
Ljubljana, Slovenija

Uredniki:

Anemari Horvat, Urška Černe

Izdal:

Slovensko fiziološko društvo, Zaloška cesta 4, 1000 Ljubljana, Slovenija

Kontakt:

Slovensko fiziološko društvo, Zaloška cesta 4, 1000 Ljubljana, Slovenija
neuroendo@mf.uni-lj.si

Programski in organizacijski odbor:

Anemari Horvat

Urška Černe

Andraž Stožer

Lidija Križančič Bombek

Nina Vardjan

FIZIOLOGIJA BREZ MEJA: DELOVANJE ORGANIZMOV V EKSTREMNIH OKOLJIH

Izobraževalna delavnica »Fiziologija brez meja: Delovanje organizmov v ekstremnih okoljih« bo potekala kot uvod v mednarodno znanstveno srečanje *Regional Physiology Meeting 2025*. Na delavnici bodo priznani slovenski znanstveniki, zdravniki in profesorji predstavili, kako se organizmi prilagajajo življenju v najzahtevnejših okoljih. Spoznali bomo, kako je človeška ribica prilagojena na življenje v podzemlju, kakšni so fiziološki izzivi pomankanja teme, kako spanje v ekstremnih okoljih vpliva na fiziologijo človeka, kako človeško telo kljubuje pomanjkanju kisika na visoki nadmorski višini ter kaj se dogaja s človeškim telesom med bivanjem v vesolju. Namen delavnice je približati fiziologijo kot temeljno vedo, ki povezuje biologijo in medicino, tako strokovni kot širši javnosti.

KAZALO

Program.....	1
Rok Kostanjšek <i>Prilagoditve človeške ribice na podzemno okolje.....</i>	2
Damjana Rozman <i>Fiziološki izzivi pomanjkanja teme.....</i>	3
Leja Dolenc Grošelj <i>Spanje v ekstremnih okoljih.....</i>	5
Lidija Križančič Bombek <i>Prilagoditve telesa na višjo nadmorsko višino.....</i>	7
Boštjan Rituper <i>(Pato)fiziološke prilagoditve delovanja kardiovaskularnega sistema na bivanje v mikrogravitaciji.....</i>	9

PROGRAM

Medicinska fakulteta, Univerza v Ljubljani (Predavalnica 2)

09:00-09:05	OTVORITEV
09:05-09:45	Rok Kostanjšek (UL BF): <i>Prilagoditve človeške ribice na podzemno okolje</i>
09:45-10:25	Damjana Rozman (UL MF): <i>Fiziološki izzivi pomanjkanja teme</i>
10:25-11:05	Leja Dolenc Grošelj (CMS): <i>Spanje v ekstremnih okoljih</i>
11:05-11:35	ODMOR
11:35-12:15	Lidija Križančič Bombek (UM MF): <i>Prilagoditve telesa na višjo nadmorsko višino</i>
12:15-12:55	Boštjan Rituper (UL MF, Klinika Golnik): <i>(Pato)fiziološke prilagoditve delovanja kardiovaskularnega sistema na bivanje v mikrogravitaciji</i>
12:55-13:00	ZAKLJUČEK

Prilagoditve človeške ribice na podzemno okolje

prof. dr. Rok Kostanjšek

Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija

Človeška ribica (*Proteus anguinus*), poznana tudi kot močeril ali proteus, je največji izključno jamski četveronožec na svetu in endemit Dinarskega krasa. Poznana je predvsem po svojem neobičajnem izgledu in prilagoditvah, ki ji omogočajo preživetje v na videz negostoljubnem podzemnem okolju. Razumevanje njenih lastnosti, vključno s prilagoditvami na podzemno okolje, zahteva vpogled v evolucijsko in razvojno (ontogenetsko) ozadje njihovega nastanka. Izgled in lastnosti te podzemne dvoživke so namreč posledica dveh različnih procesov, neotenije in prilagoditev na podzemno okolje. Neotenija (ohranjanje nekaterih larvalnih lastnosti pri spolno zrelih osebkih) je pri človeški ribici izražena kot prisotnost zunanjih škrg, neporoženela koža s pobočnico, repna plavut, škržne reže in nekatere značilnosti lobanjskega skeleta. Lastnosti kot so izguba kožnega pigmenta, redukcija oči in prilagoditve drugih čutil, ter podaljšanje telesa, lobanje in okončin pa so posledice prilagoditev na podzemno okolje.

Izgubo funkcionalnega vida človeška ribica nadomešča z zaznavanjem svetlobe s kožo ter povečano občutljivostjo ostalih čutil. Pri zaznavanju okolice se tako poleg tipa zanaša na zaznavanje vodnih tokov, električnega in magnetnega polja, okus, vonj in zelo občutljiv sluh. Njene fiziološke prilagoditve na podzemno okolje vključujejo izredno sposobnost stradanja, nizek metabolizem in odpornost na anoksične pogoje. Med njenimi nenavadnimi lastnostmi je vsekakor potrebno omeniti izjemno sposobnost regeneracije, ki ji omogoča popolno nadomeščanje in obnovo poškodovanih delov telesa, kot tudi izredno dolgoživost. Človeška ribica namreč sodi med najbolj dolgožive živali, saj lahko kljub relativno majhni telesni masi dočaka starost primerljivo človeški.

Fiziološki izzivi pomanjkanja teme

prof. dr. Damjana Rozman

Center za funkcijsko genomiko in bio-čipe, Inštitut za biokemijo in molekularno genetiko, Medicinska fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija

Človeški organizem je skozi evolucijo razvijal svojo fiziologijo v ritmu dneva in noči. Naravna izmenjava svetlobe in teme uravnava notranjo uro oziroma cirkadiani ritem, ki vpliva na spanje, presnovo, hormonsko ravnovesje ter imunski sistem. Eden ključnih mediatorjev teh procesov je hormon melatonin, ki ga izloča žleza češarika ponoči, ob odsotnosti svetlobe. V zadnjih desetletjih se vse pogosteje izpostavljamu umetni svetlobi v notranjih prostorih tudi v večernem in nočnem času, kar bistveno spreminja fiziološke vzorce in predstavlja nov javnozdravstveni izziv. Umetna svetloba, zlasti modri spekter (npr. LED in zasloni elektronskih naprav), zavira sintezo melatonina. Ta hormon sicer doseže vrh izločanja v poznih nočnih urah in signalizira telesu, da je čas za spanje. Če svetloba ostane prisotna, se izločanje zmanjša, posledično pa pride do težav z uspavanjem in slabše kakovosti nočnega počitka. Dolgotrajne motnje vodijo do kronične utrujenosti, zmanjšane kognitivne zmogljivosti in večje dovzetnosti za nesreče pri delu ter v prometu.

Melatonin pa ima pomembne vloge tudi kot antioksidant in imunomodulator. Pomanjkanje lahko prispeva k večjemu oksidativnemu stresu in kroničnim vnetjem. Številne epidemiološke študije so povezale nočno izpostavljenost svetlobi s povečanim tveganjem za presnovni sindrom, debelost, sladkorno bolezen tipa 2 in srčno-žilne bolezni. Posebej izrazite so posledice pri delavcih v večizmenskem delovnem ritmu, kjer poročajo tudi o večji pojavnosti hormonsko odvisnih rakov, kot sta rak dojke in prostate, kar je deloma lahko povezano z zmanjšanim delovanjem melatonina.

Pri otrocih in mladostnikih je problem še izrazitejši, saj vse več časa preživijo pred zasloni, pogosto v poznih večernih urah. Njihovi cirkadiani sistemi so občutljivejši, zato umetna svetloba povzroča večje premike v ritmu in vpliva na razvoj ter duševno zdravje. Pomanjkanje spanja je povezano s slabšo pozornostjo, več hiperaktivnosti ter višjo pojavnostjo anksioznosti in depresije. Zaključimo lahko, da pomanjkanje teme zaradi prekomerne umetne svetlobe v notranjih prostorih predstavlja pomemben fiziološki izziv sodobnega človeka. Ne gre zgolj za vprašanje kakovosti spanja, temveč za širše posledice na endokrino, presnovno in imunsko ravnovesje, s tem pa tudi na dolgoročno zdravje. Ohranjanje teme in ritma melatonina je žal pogosto spregledani del preventivne medicine.

Spanje v ekstremnih okoljih

prof. dr. Leja Dolenc Grošelj

Center za motnje spanja, Ljubljana, Slovenija

Alpinisti pogosto poročajo, da je na višini uspavanje podaljšano, spanje je slabše kvalitete, s pogostimi prebujanji, lahko so pridružene tudi spremembe v dihanju. Različne študije so preučevale subjektivne parametre spanja na višini, medtem ko so objektivne, kontrolirane študije na višini redke. Znano je, da na višini nad 2500 m dihanje pri zdravih posameznikih pogosto postane periodično, z obdobji hitrega dihanja, ki mu sledijo pavze dihanja, kar je prisotno tako v budnosti kot med spanjem. Do sedaj je prevladovalo mnenje, da se ob dolgotrajnem bivanju v hipoksičnem okolju delež periodičnega dihanja zmanjša. Mehanizem vpliva telesne aktivnosti na periodično dihanje ostaja nerazjasnjen, čeprav vemo, da se delež periodičnega dihanja v budnosti ob telesni aktivnosti v hipoksičnem okolju poveča.

V predavanju bodo predstavljene objektivne polisomnografske raziskave spanja in dihanja na višini ter vpliv telesne vadbe na periodično dihanje. Zanimalo nas je, kaj se dogaja z dihanjem med spanjem na višini glede na telesno vadbo preko dneva. Predstavljeni bodo rezultati 10 in 21 dnevne študije mladih odraslih v normobaričnem hipoksičnem okolju v Olimpijskem Centru v Planici (ekvivalent 4000 m nadmorske višine), ki so bili preko dneva izpostavljeni fizični aktivnosti oziroma mirovanju. Rezultati kratkotrajnega bivanja na višini bodo primerjani z rezultati dolgotrajne študije na zdravih odraslih, ki so več kot 13 mesecev bivali v hipobaričnem hipoksičnem okolju raziskovalne baze Concordia na Antarktiki (nadmorska višina 3,800 m).

Primerjava kratkotrajne in dolgotrajne izpostavitve hipoksičnemu okolju je pokazala, da fizična aktivnost sama po sebi zniža nivo zasičenosti s kisikom v arterijski krvi (SaO_2) in poveča število pavz dihanja med spanjem. Pri ljudeh, ki predhodno niso živeli na višini tudi ob dolgotrajnemu bivanju v

hipobaričnem hipoksičnem okolju (več kot leto dni) do adaptacije periodičnega dihanja ne pride.

Tako kot študije na višini, so redke tudi objektivne študije, ki raziskujejo parametre spanja v pogojih breztežnosti. Zaradi bodočih dolgotrajnih misij v vesolje je pomembno zavedanje, kaj se dogaja z organizmom med spanjem v ekstremnih pogojih breztežnosti. Prikazani bodo rezultati polisomnografskih študij v pogojih simulirane breztežnosti opravljenih v Olimpijskem Centru v Planici.

Skupni učinek neaktivnosti in hipoksije na strukturo spanja in dihanje med spanjem pri ljudeh pa ni pomemben le za alpiniste in bodoče astronavte. Vse pogostejše motnje dihanja med spanjem v splošni populaciji predstavljajo pomemben dejavnik tveganja za srčno-žilne bolezni, kot so srčni infarkt, možganska kap in nenadna smrt med spanjem. Rezultati objektivnih kontroliranih študij so zato pomembni tudi za razumevanje patofiziologije motenj spanja in dihanja ter srčno-žilnih obolenj in predstavljajo priložnost za nove terapevtske pristope.

Prilagoditve telesa na višjo nadmorsko višino

doc. dr. Lidija Križančič Bombek

Inštitut za fiziologijo, Medicinska fakulteta, Univerza v Mariboru, Maribor, Slovenija

Predavanje obravnava fiziološke prilagoditve človeškega telesa na višjo nadmorsko višino, kjer se zaradi nižjega zračnega tlaka zmanjšuje razpoložljivost kisika. Osredotoča se na mehanizme, ki omogočajo telesu, da kljub hipoksiji (pomanjkanju kisika) ohranja osnovne življenjske funkcije, zlasti med fizičnim naporom.

V uvodu je poudarjena vloga kisika pri aerobni oksidaciji hranil, ki celicam omogoča proizvodnjo energije (ATP). Zrak je mešanica plinov, kjer kisik predstavlja približno 21 %. Delni tlak kisika (PO_2) je odvisen od skupnega zračnega tlaka, ki se z nadmorsko višino zmanjšuje. Na primer, PO_2 na vrhu Triglava znaša le 115 mmHg, medtem ko je ob morju 159 mmHg. Predavanje razloži, kako se kisik iz alveolov v pljučih difuzijsko prenese v kri, nato pa s hemoglobinom potuje do tkiv. Difuzijska kapaciteta pljuč je odvisna od površine alveolov, debeline alveolokapilarne pregrade in difuzijskega koeficienta plina. Venska kri ima nižji PvO_2 , ki se spreminja glede na porabo kisika v tkivih.

Prenos kisika po telesu je odvisen od minutnega volumna srca (MVS), koncentracije hemoglobina in njegove nasičenosti s kisikom. Med vadbo se MVS poveča, kar omogoča večjo dostavo kisika tkivom. V mišicah se kisik pasivno prenese iz krvi, pri čemer lokalni pogoji (pH, temperatura, PCO_2) vplivajo na sproščanje kisika iz hemoglobina.

Drugi del predavanja izpostavi nevarnosti in težave, s katerimi se telo sooča na visoki nadmorski višini, saj se z višanjem nadmorske višine zračni tlak eksponentno znižuje, kar vodi v hipoksijo. Poleg tega se z višino znižujeta tudi temperatura (približno 1 °C na 150 m), kar povečuje tveganje za podhladitev in ozeblino, in vlažnost zraka, kar prispeva k dehidraciji.

Na višini se alveolna ventilacija poveča, da bi telo nadomestilo nižji PO_2 . Kljub temu se PAO_2 bistveno zmanjša (npr. na 4810 m znaša le 45 mmHg), kar zmanjša hitrost difuzije kisika v kri za približno 75 %.

Ob akutnem vzponu na višino se aktivirajo kemoreceptorji, ki zaznajo spremembe v PCO_2 in PO_2 ter sprožijo povečano dihanje. To vodi v respiratorno alkalozo, ki ima več fizioloških učinkov, vključno z zmanjšano nasičenostjo hemoglobina. Ledvice se prilagodijo z izločanjem bikarbonatov, kar pomaga uravnavati pH krvi. Dolgoročno se v telesu poveča sinteza hemoglobina in rdečih krvničk, kar izboljša prenos kisika v in po telesu.

Bivanje na višji nadmorski višini je seveda mogoče, a bistveno omejuje telesni napor zaradi zmanjšane dostave kisika, nižjega PAO_2 in slabše oksigenacije krvi. Za preživetje in uspešno delovanje v takšnih pogojih so torej nujne kratkoročne in dolgoročne prilagoditve telesa.

(Pato)fiziološke prilagoditve delovanja kardiovaskularnega sistema na bivanje v mikrogravitaciji

dr. Boštjan Rituper

*Medicinska fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija
Univerzitetna klinika za pljučne bolezni in alergijo Golnik, Golnik, Slovenija*

Na Zemlji delovanje kardiovaskularnega sistema (KVS) pogojuje gravitacijska sila, ki v stoječem položaju ustvarja hidrostatski tlačni gradient med glavo in nogami. Za ohranjanje homeostaze in zagotavljanje zadostne možganske perfuzije so se razvili robustni kompenzacijski mehanizmi. V uravnavanje delovanja KVS se vpletajo živčni, hormonski in lokalni vplivi (avtoregulacija). Lokalni vplivi so pomembni predvsem za uravnavanje pretoka krvi skozi organe, živčni in hormonski pa primarno uravnavajo arterijski tlak in volumen krvi.

Ob vstopu v mikrogravitacijsko okolje hidrostatski gradient izgine, kar sproži premik približno dveh litrov telesnih tekočin iz spodnjih okončin v področje prsnega koša in glave. Hemodinamski odziv vključuje povečanje utripnega volumna, kar vodi do povišanja minutnega volumna srca za približno 20 %. Kompenzatorno se znižata srčna frekvenca in periferni žilni upor, kar omogoča, da se srednji arterijski tlak ohranja v fizioloških mejah. Klinično se spremembe kažejo kot edem obraza in zmanjšanje obsega nog. Telo premik volumna interpretira kot stanje centralne volumnske preobremenitve in sproži srednje- in dolgoročne prilagoditvene mehanizme.

Aktivirajo se mehanizmi za normalizacijo centralnega volumna, kar v nekaj dneh privede do zmanjšanja volumna krvne plazme za približno 20 %. Gre za posledico kombinacije zmanjšane vnosa tekočin zaradi potlačene občutka žeje in prerazporeditve tekočine v okoliška tkiva. Zmanjšana hemodinamska obremenitev srca, ki mu ni več treba delovati proti hidrostatskim gradientom, vodi v progresivno srčno atrofijo – zmanjšanje volumna in mase miokarda. Atofija srčne mišice in višje

koncentracije stresnih hormonov (kortizola in adrenalina) povečajo verjetnost za razvoj srčnih aritmij. Hkrati se zmanjša še tonus krvnih žil.

Opisane adaptacije se ob vrnitvi na Zemljo lahko manifestirajo kot resen klinični problem, ki ga opisujemo z besedno zvezo ortostatska intoleranca. Ob zavzetju stoječega položaja gravitacija ponovno povzroči kopičenje krvi v spodnjem delu telesa. Pri na gravitacijo adaptirani osebi se aktivirajo mehanizmi, ki preprečujejo razvoj hipotenzije. Ti mehanizmi po dalj časa trajajočem bivanju v mikrogravitaciji niso več dovolj učinkoviti. Neučinkovitost je posledica relativne hipovolemije (zmanjšan znotrajžilni volumen povzroči drastičen padec venskega priliva v srce), srčnega dekondicioniranja (atrofirana srčna mišica ima zmanjšano črpalno sposobnost) in avtonomne disfunkcije (desenzitizacija baroreceptorskega refleksa). Posledica je padec arterijskega tlaka, ki lahko povzroči vrtoglavosti ali izgubo zavesti.

Za ublažitev opisanih kardiovaskularnih sprememb so ključni preventivni ukrepi. Najpomembnejši je strog režim redne telesne vadbe na krovu mednarodne vesoljske postaje, ki vključuje tako aerobni kot uporovni trening in dokazano izboljšuje baroreptorsko funkcijo. Nekaj ur pred pristankom na Zemlji astronauti zaužijejo približno liter izotonične raztopine, da akutno povečajo volumen krvi in zmanjšajo verjetnost vrtoglavosti ali izgube zavesti. Sledi vsaj 45 dni trajajoč program rehabilitacije, katerega namen je pomagati telesu pri ponovni prilagoditvi na Zemljino gravitacijo, obnoviti mišično moč, kostno gostoto, srčno-žilno zmogljivost in ravnotežje na raven pred poletom ter preprečiti dolgoročne zdravstvene težave.

Viri:

1. RITUPER, Boštjan. Kardiovaskularni kompromis v mikrogravitaciji - kako se obnaša srce v vesolju. V: VRANEŠIČ, Romana (ur.). Zbornik predavanj. Ljubljana: Društvo študentov medicine Slovenije, 2018. Str. 27-44, ilustr. ISBN 978-961-94214-4-4.
2. RITUPER, Boštjan. Patofiziologija poletov v vesolje. V: RITUPER, Boštjan (ur.). Seminarji iz patološke fiziologije. 4., popravljena izd. Ljubljana: Medicinska fakulteta, Inštitut za patološko fiziologijo, 2019. Str. 91-98, ilustr. ISBN 978-961-94794-2-1.



