

Fysiologie v extrémních podmínkách

vaclav.hampl@lf2.cuni.cz

<http://fyziologie.lf2.cuni.cz>

<http://vh.cuni.cz>



UNIVERZITA KARLOVA
2. lékařská fakulta



1

**JAK FUNGUJE NAŠE TĚLO
V EXTRÉMNÍCH PODMÍNKÁCH**

Prof. RNDr.
**Václav
Hampl,**
DrSc.

PŘEDNÁŠKA
REKTORA
UNIVERZITY
KARLOVY,
PŘENÁŠENÁ
ŽIVĚ NA
PORTÁLU
WWW.CT24.CZ

<http://www.ceskatelevize.cz/ct24/kultura/231365-prednaska-jak-funguje-nase-telo-v-extremnich-podminkach/>

17. ČERVNA, 18:00



2

Jaké extrémní podmínky?

Skoro každá veličina zevního prostředí může
nabýt extrémních hodnot



3



4



5



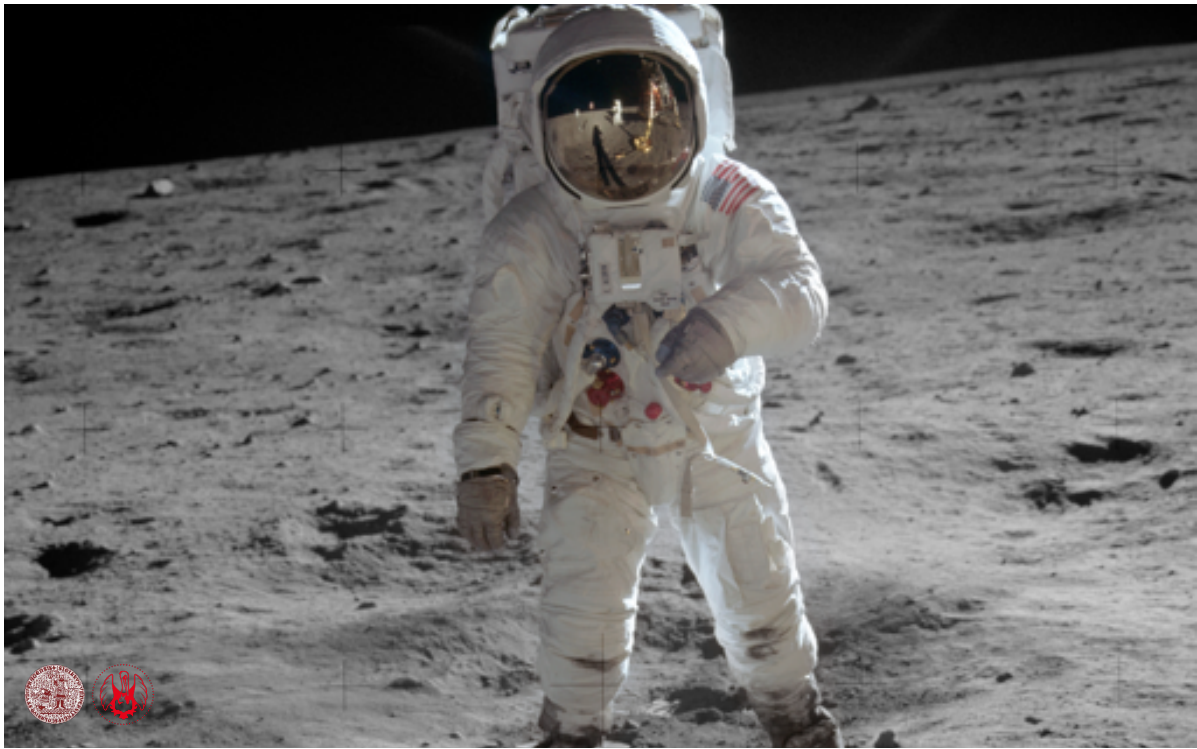
6



7



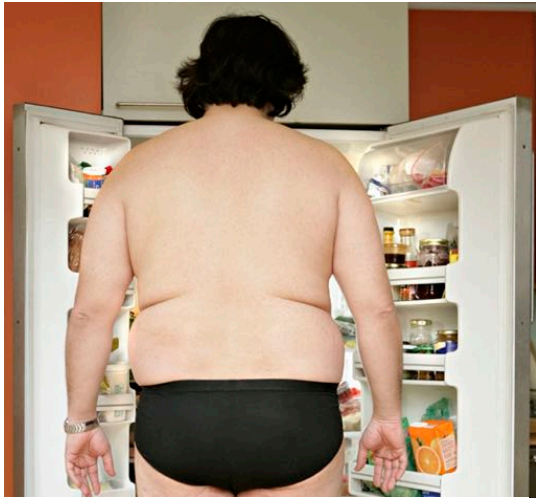
8



9



10



11



12

Akutní ("poplachová") reakce

- Maximální využití rezerv

Např. pád do ledové vody

- Nebývá trvale udržitelná



14

Vyčerpání

- Příliš dlouhá/silná expozice

Např. trosečníci z Titanicu



15

Aklimatizace (odolnost)

- Selektivní rozvoj nejvhodnějších specifických způsobů ochrany

Např. otužilci ve Vltavě

- Má meze
Např. ani otužilci by nepřežili ztroskotání Titanicu



16

Evoluční adaptace

- Druh/populace po mnoho generací
- Např. Eskymáci odolnější k zimě



17

Nízký parciální tlak O_2

- Vysoká nadmořská výška
- Plicní a srdeční nemoci
- Letadla
 - Dekomprese
 - V kabině normálně tlak ~1800-2500 m



19

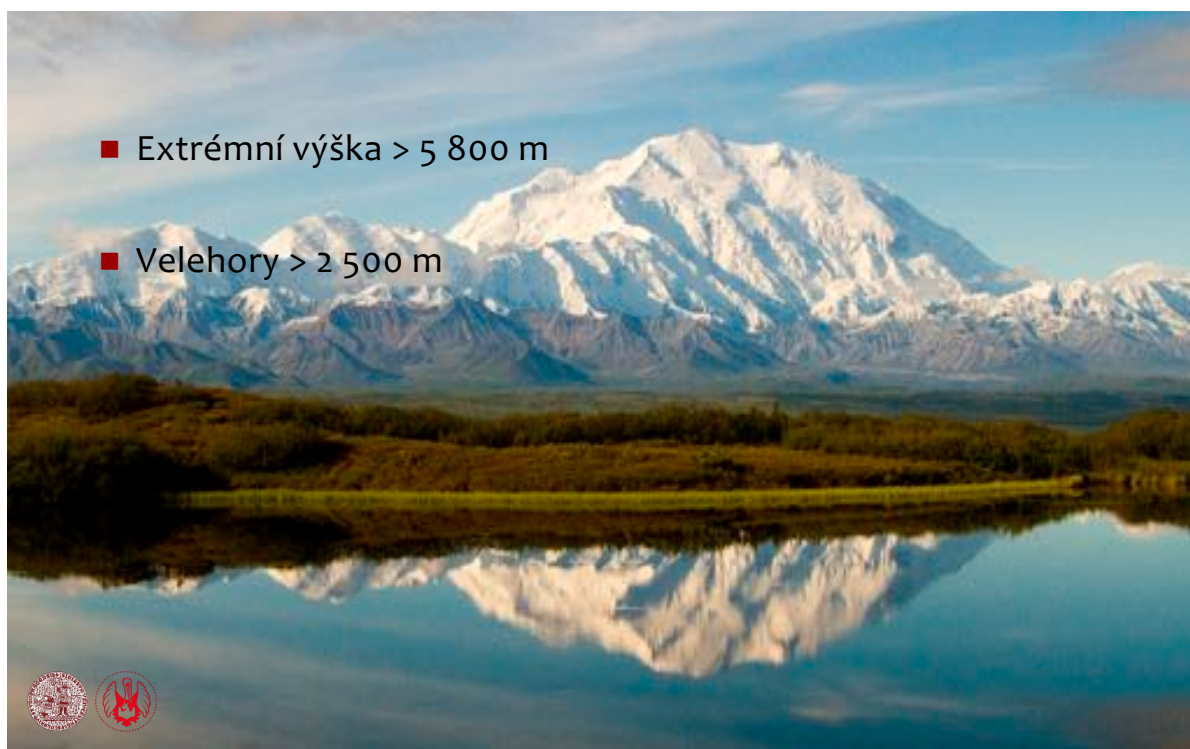
Proč je ve výšce hypoxie?



- Atmosféra: 21 % O_2 až po Karmanovu hranici (~ 100 km)
- Vzduch je stlačitelný
- Proto při nízkém tlaku ve stejném objemu méně molekul - tedy i méně molekul O_2

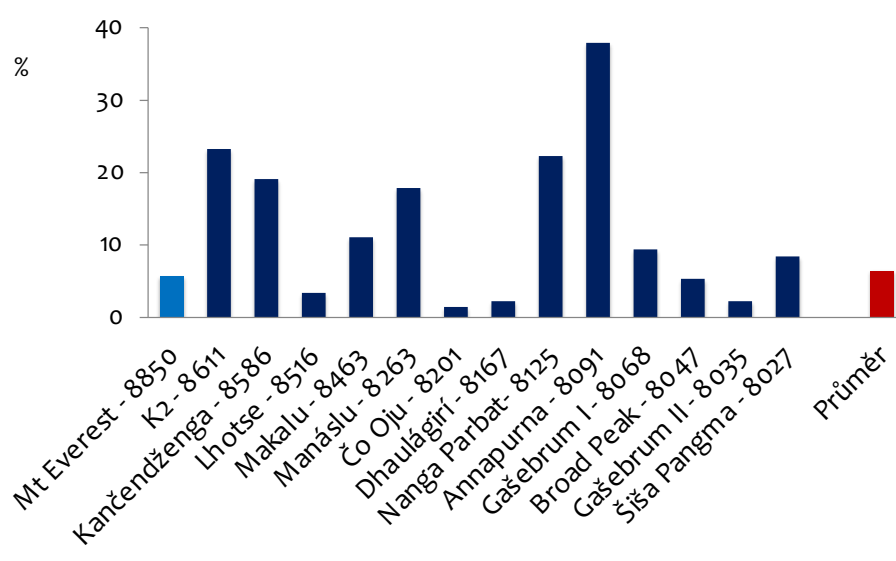


20



21

Úmrtnost na osmitisícovkách



23

Akutní reakce na výšku

Od ~ 3 000 - 3 500 m:

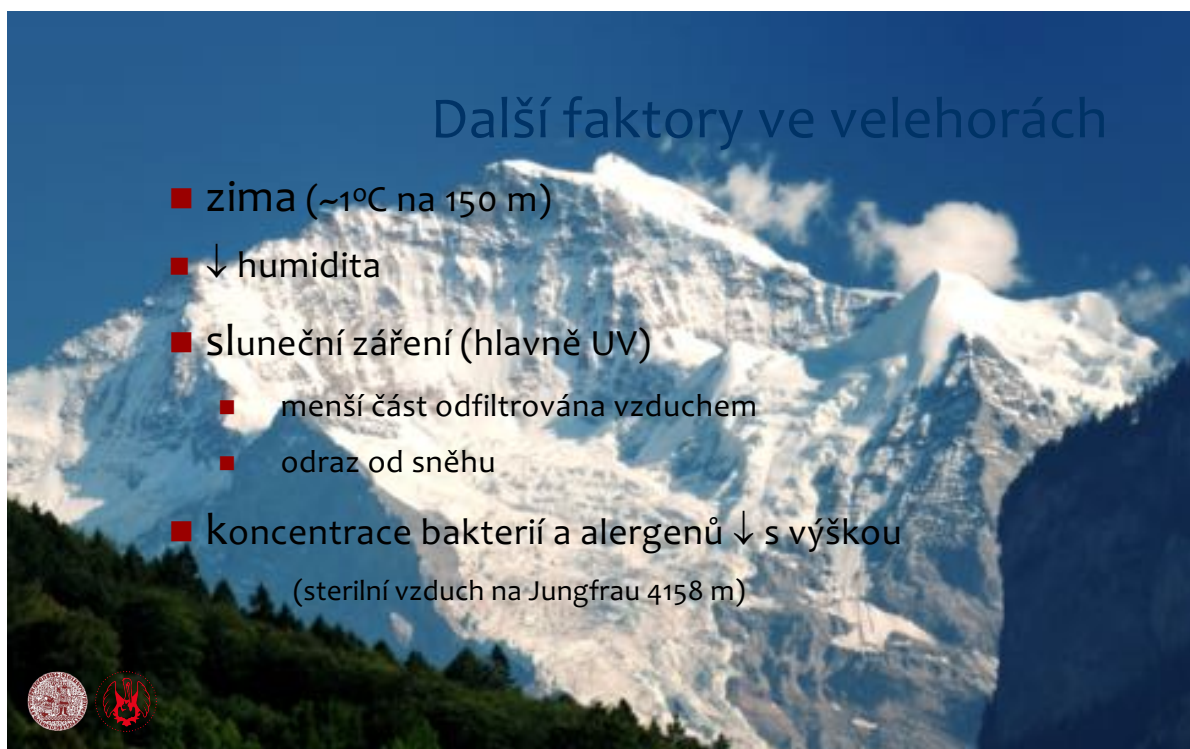
- svalová únava
- malátnost
- mentální výkonnost ↓
(úsudek, paměť, jemná motorika)
 - Přispívá k mortalitě ve velehorách
 - Pomalu reversibilní
(kognitivní abnormality rok po Everestu)
- nauzea
- euforie
- bolesti hlavy



24

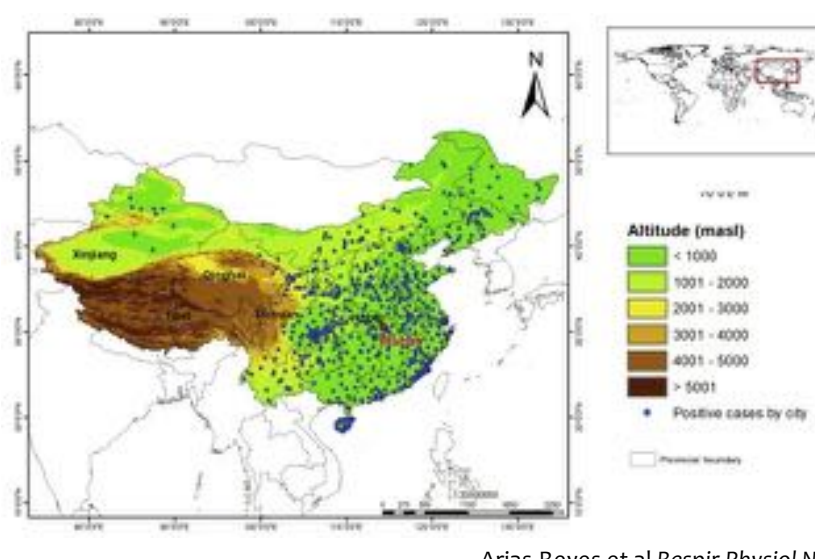


25



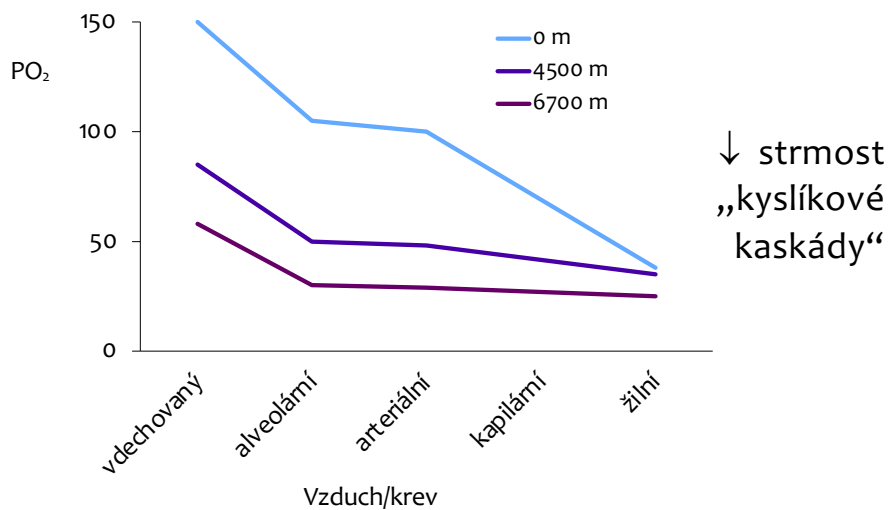
26

3x méně Covid-19 ve velehorách

Arias-Reyes et al *Respir Physiol Neurobiol* 2020

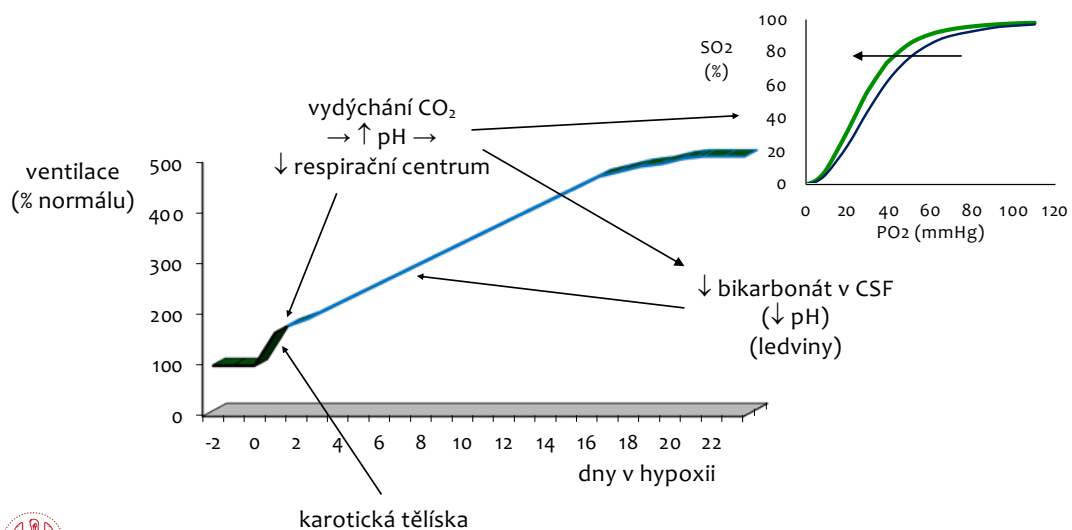
27

Aklimatizace na chronickou hypoxii



28

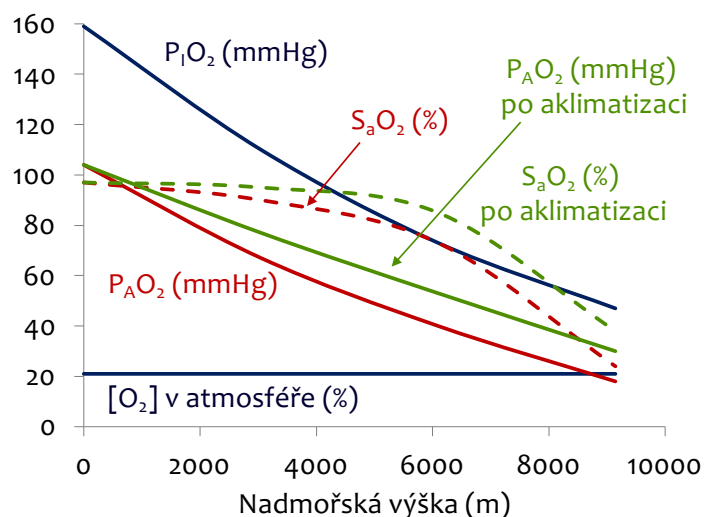
1. ↑ plicní ventilace



Periodické dýchání v noci (Cheyne-Stokesova respirace)

29

Aklimatizace zlepšuje P_{AO_2} a tím i S_aO_2



30

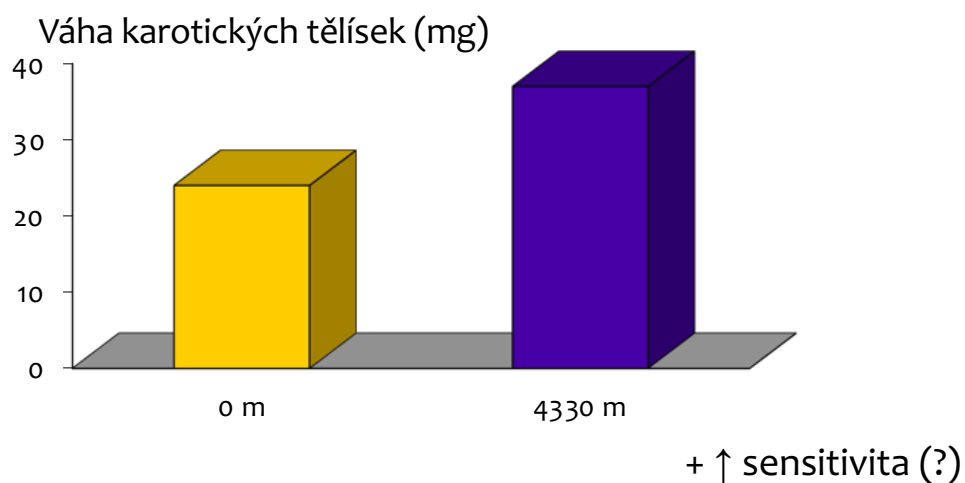
Hyperventilace

- > 3000 m
- zvyšuje P_{AO_2} (o ~8 mmHg v 5000 m - stejně jako sestup o 1000 m)
- Asi ne nezbytná
 - slabá u některých špičkových horolezců
(Peter Habeler - první na Everestu bez O_2 - 1978 s Messnerem)
- domorodci z velehor < lidé z nížiny (?)



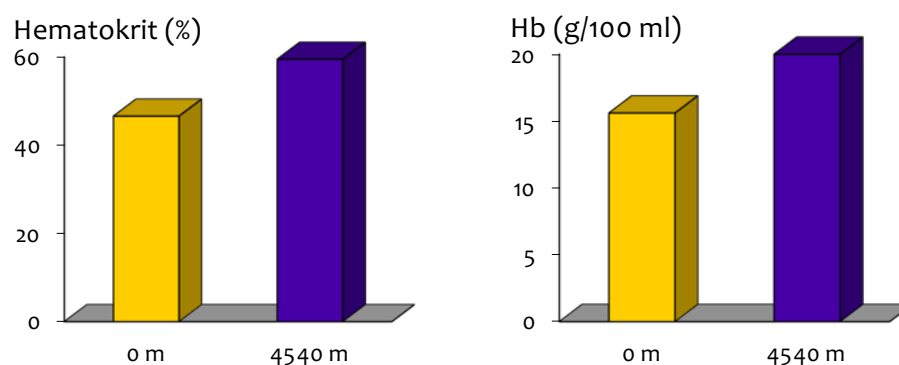
31

Hyperplasie karotických tělísek



32

2. ↑ erytropoéza

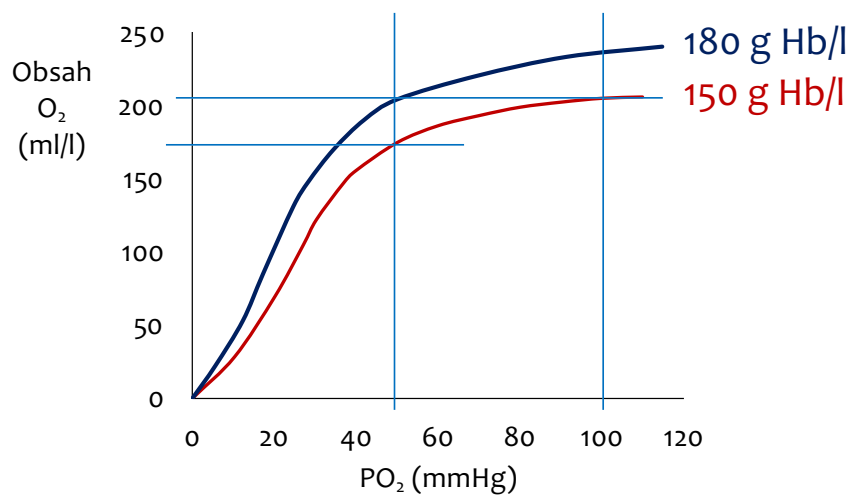


- Nejdříve dehydratace (↓ pití, ↑ ventilace)
→ ↓ objem plasmy → ↑ relativní [Hb]
- Brzy ↑ tvorba krvinek



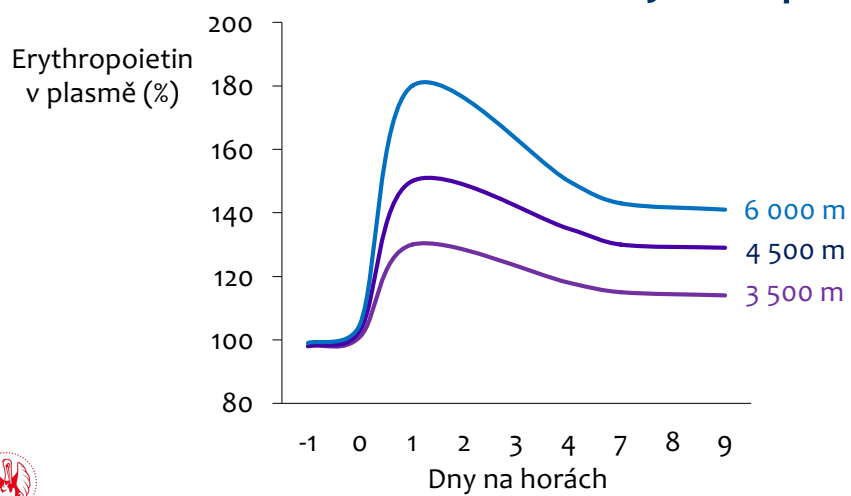
33

Polycytémie kompenzuje $\downarrow PO_2$

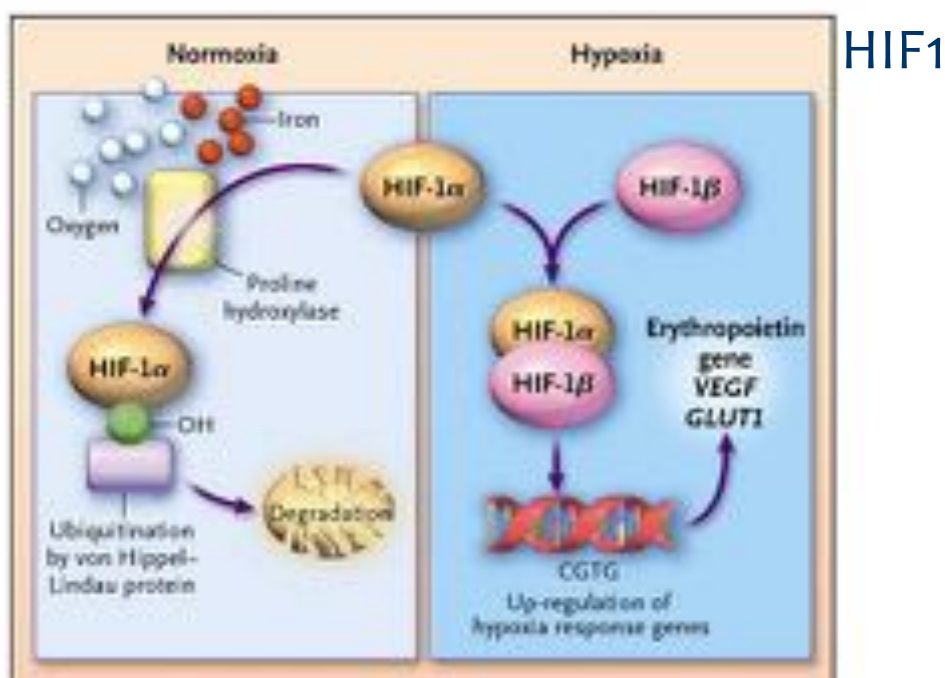


34

Hypoxie stimuluje tvorbu erythropoietinu



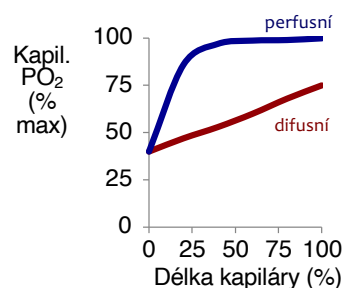
35



36

3. ↑ difuze plynů do krve

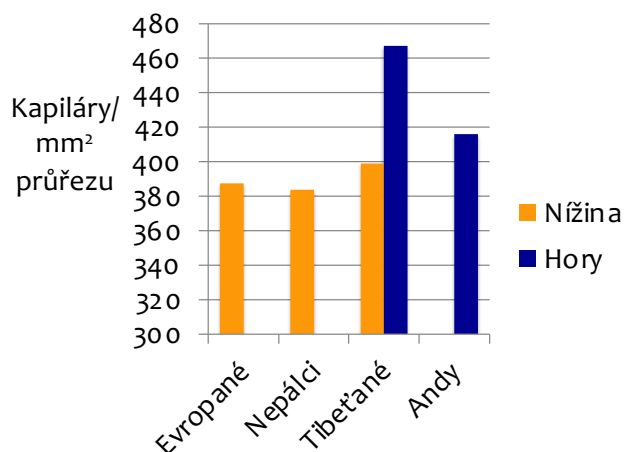
- Normálně ~ 21 ml O₂/mmHg/min, ↑ ≤ 3x
 - Roztažení plic hyperventilací → ↑ povrch alveolů
 - Plicní hypertenze → ↓ mrtvý prostor (zóny)
 - Relativní růst plic
- Při námaze v extrémní výšce může difuze limitovat oxygenaci:
 - ↓ A-a PO₂
 - ↑ rychlost krve v kapilárách



37

4. ↑ vaskularizace tkání

- ↓ difuzní dráhu v tkáních
- Asi proto lehce ↓ STK (~10 mmHg)
- Výraznější u těch, co se v hypoxii narodili
- VEGF (HIF-1)



38

5. ↑ extrakce a utilizace O₂ ve tkáních

- Klíčové
- Ne moc jasné
 - ↑ aktivita O₂-dependentních enzymů (HIF1-3)



39

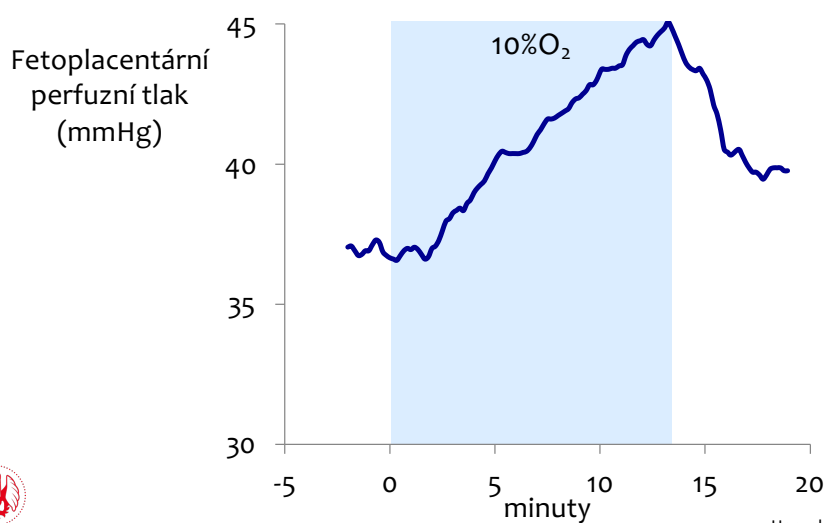
Další účinky hypoxie

- Hubnutí (anorexie, dehydratace)
- Fertilita ↓, menstruační poruchy, menší novorozenci (HFPV?)
- Často neuzavřený ductus arteriosus
(normálně ho zavírá normoxie)
- Plicní hypertenze
- Hypertrofie pravé srdeční komory
- Méně systémové hypertenze



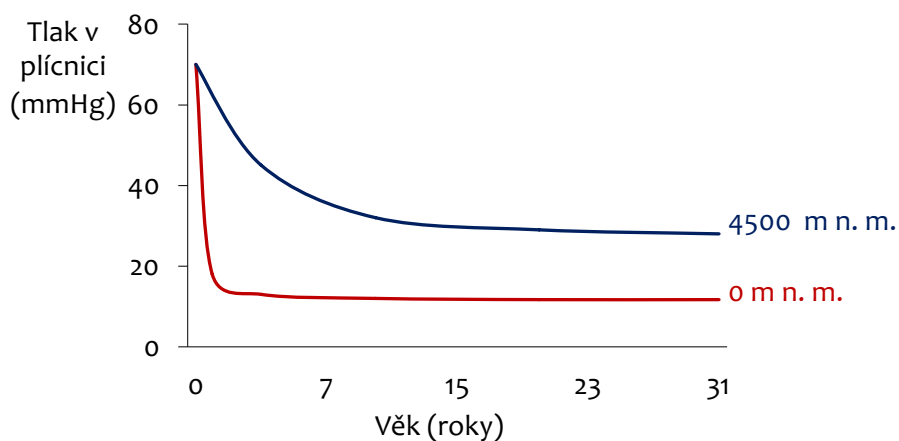
40

Hypoxická fetoplacentární vazokonstrikce

Hampl et al, *Am J Physiol* 2002

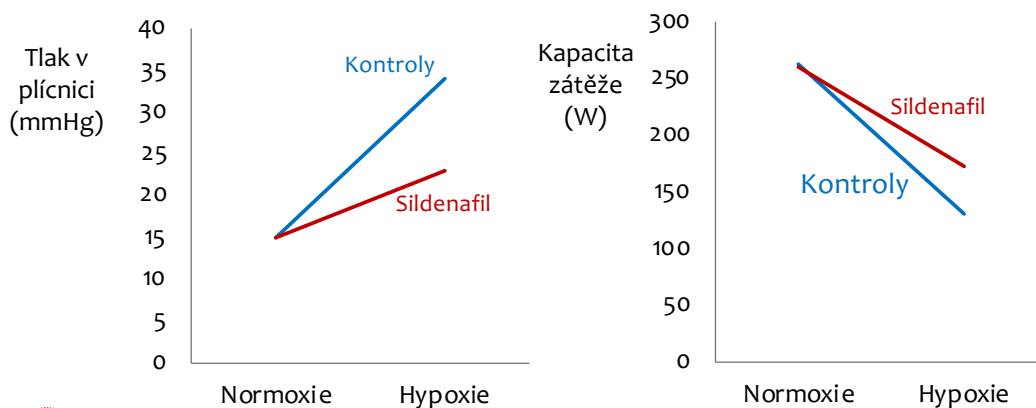
41

Hypoxie brzdí pokles tlaku v plicnici po narození



42

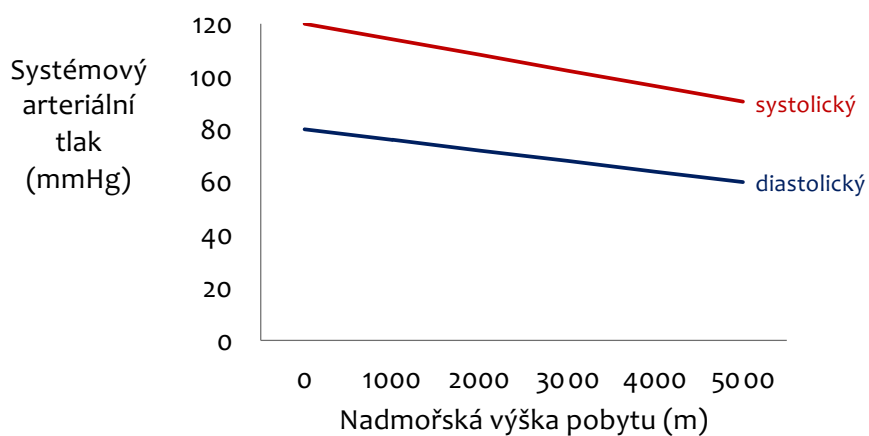
Redukce plicní hypertenze zlepšuje výkonnost v hypoxii



Ghofrani et al. Ann Intern Med 2004

43

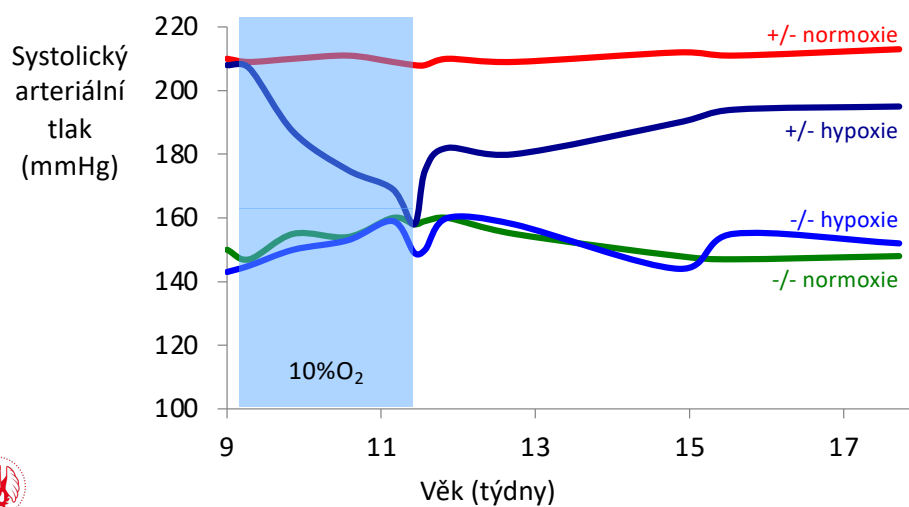
Nižší systémový krevní tlak u obyvatel vysokých hor



Aryal et al: *High Alt Med Biol* 2016

44

Chronická hypoxie normalizuje hypertenzi mRen-2 +/- krys



Červenka et al: *Physiol Res* 64, 2015

46

Adaptace populací: 3 strategie

- Tibet
 - průměr > 4500 m
- Andy
 - průměr ~ 3750 m
- Etiopie
 - průměr > 2500 m



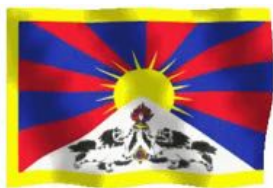
47

Adaptace populací

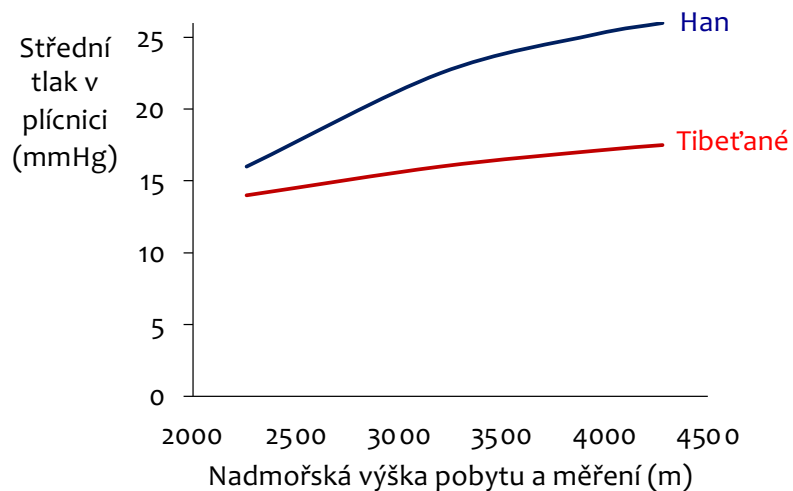
- 5019 m nejvyšší trvalé osídlení v Tibetu (Wenquan)
- 5100 m nejvyšší trvalé osídlení (Andy - La Rinconada, Peru)
- 5790 m nejvyšší trvalé pracoviště (Andy, přespávají trochu níž)
- Adaptace od narození lepší než i dlouhodobá později
velký hrudník, malé tělo



48

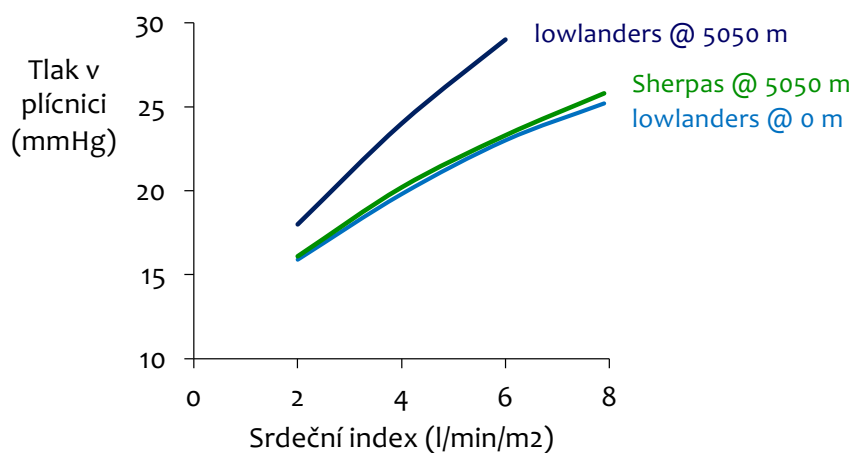


Adaptace populací: menší plicní hypertenze



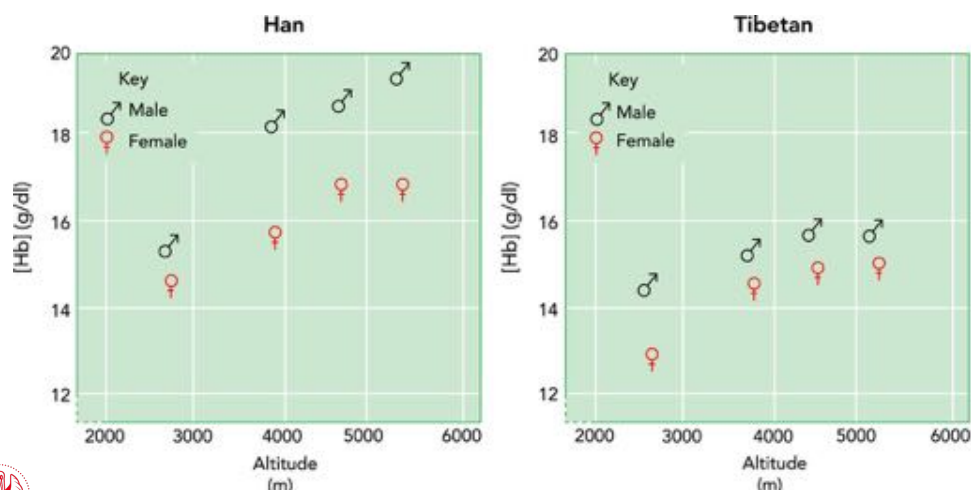
49

Adaptace Šerpů – P/Q ve výšce stejné jako u kontrol v nížině

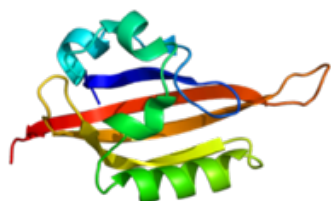


51

Polycytémie

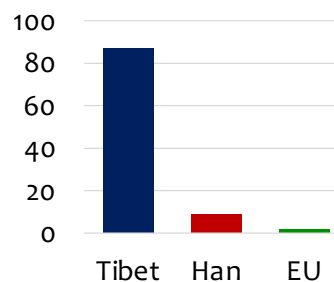


52



HIF-2α (EPAS1)

- endothelial PAS domain-containing protein 1
- v závislosti na P_{O_2} řídí expresi řady genů (vč. erythropoietinu)
- Tibet: neobvyklá varianta genu, odpovídá za lepší adaptaci



53



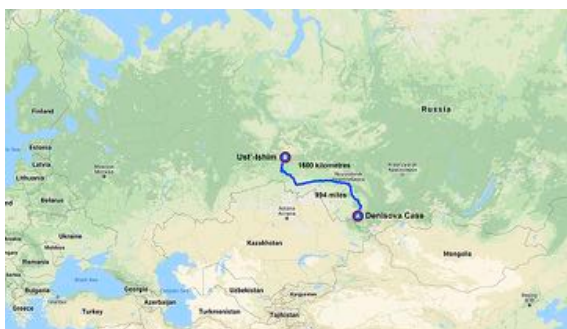
Adaptace v Tibetu

- Zdroj neobvyklé varianty EPAS1 u Tibet'anů: *Denisované* (vymřeli nejpozději před 15 tis. lety)
- Tibet'ané jsou na náhorní plošině několik tisíc let



Huerta-Sanchez et al: Nature 2014

54



Denisované

- objeveni 2010
- hominidi žijící paralelně s *Homo sapiens* a *Homo neanderthalensis*
- nejvíc jejich genomu (3-5 %) dnes mají Melanézané, Papuánci a australští aboriginci

55

Poruchy aklimatizace

- Akutní výšková nemoc
- Výškový plicní edém (HAPE)
- Výškový edém mozku
- Chronická výšková choroba



56

Akutní horská nemoc

- Aklimatizace pomalejší než výstup
- Častá, zejména po náhlém výstupu do výšky
 - 15-25 % lidí v 2000-3000 m
 - až 67% lidí v 4300 m
- Nástup obvykle do 6 hod
 - často až po 12-24 hod
- Vrcholí 2-3 den



57

Akutní horská nemoc: příznaky (alespoň 3 z dlouhého seznamu)

- Bolest hlavy
- Nespavost
- Neúměrná únava
- Závratě
- Nechutenství
- Nausea, zvracení
- Desorientace
- Nesoustředěnost
- Dyspnea, hl. při námaze
- Kašel
- Hrudní bolest
- Tachykardie
- Palpitace
- Oligurie
- Edém nohou
-



Snadná záměna: vyčerpání - dehydratace - hypothermie - migréna - kocovina

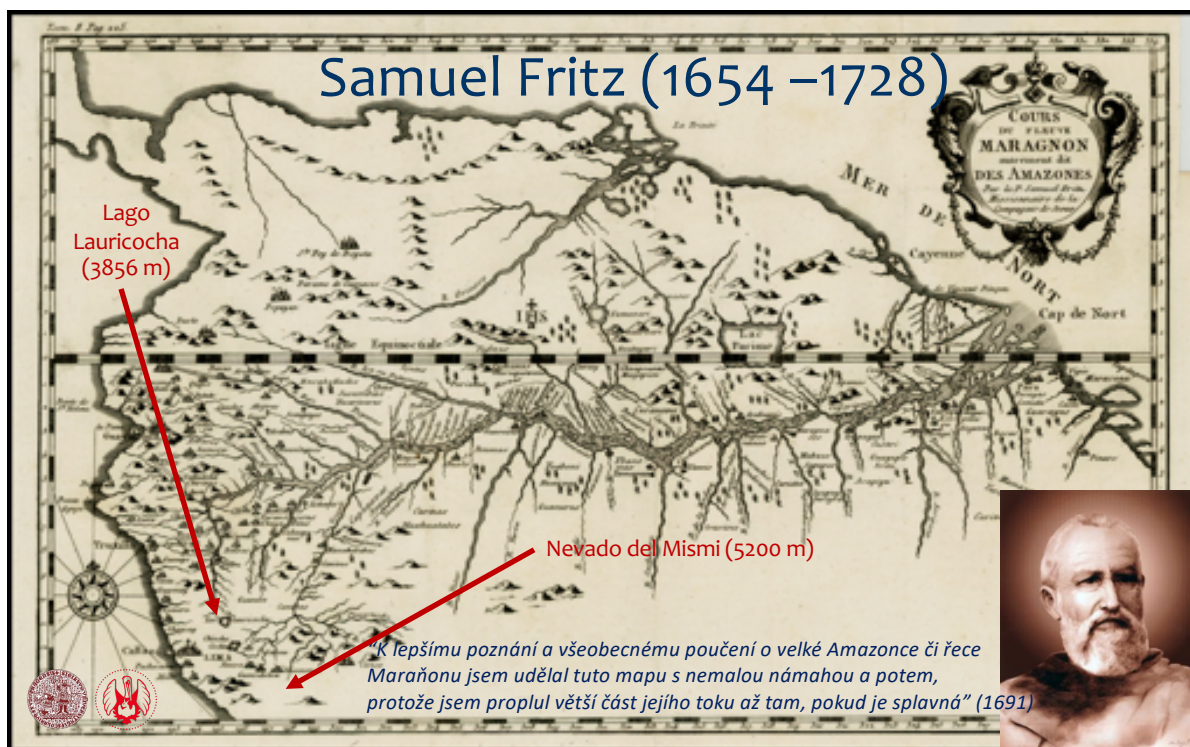
58

Akutní horská nemoc: příčiny

- Ne úplně jasné
- Asi mírný edém mozku (a plic a nohou)
- Asi z příliš silné hypoxické vazodilatace
- Také oligurie nejasného původu
- retence Na^+ a vody



59



60



61



62

Akutní horská nemoc: prevence

■ Pomalý výstup

- následující noc
max 600 m výš

■ Hodně pít, ne alkohol

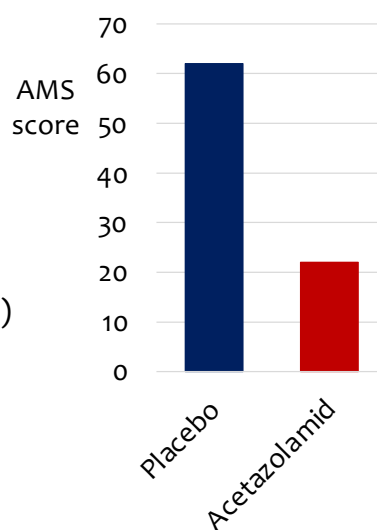
■ Acetazolamid (Diluran)

(125-250 mg/d, rozložit během dne, začít předem)

- ↑ exkrece bikarbonátu → ↑ ventilace
- lepší diuréza (u aklimatizovaných je ↑)
- ↓ plicní hypertenze

■ Dexamethason (4-8 mg/d)

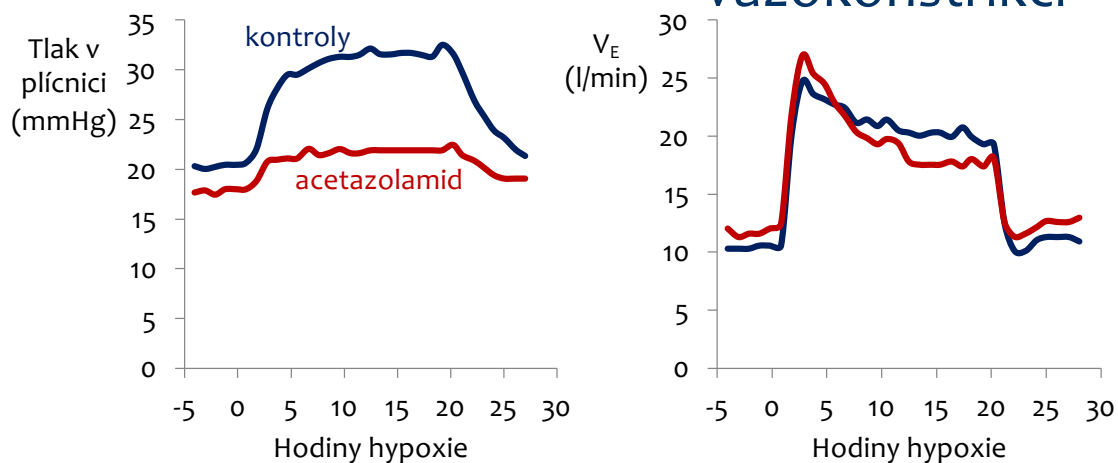
■ Antioxidační vitamíny



Indiáni: Coca tea

63

Acetazolamid inhibuje hypoxickou plicní vazokonstrikci



Teppema et al Am J Respir Crit Care Med 2007

64

Akutní horská nemoc: léčba

- Obvykle spontánní ústup za 3-4 dny
- O_2 (sám) moc nepomáhá
- Diuretika
- **Klid**
- **Zastavit výstup** do odeznění!!!
(jinak riziko HAPE, HACE, +)
- Nepomůže-li, sestoupit
- Acetazolamid (až 1000 mg)
- Dexamethason (4 mg po 6 h) - ↑ ventilační adaptaci



68



HAPE (High Altitude Pulmonary Edema)

- Velmi odlišný od jiných typů
- V prvních 2-4 dnech výstupu (obvykle rychlého) nad ~2500 m, nejčastěji 2. noc, nemusí předcházet AMS
- Incidence >15%, asi víc u mužů
- Bez léčby fatální během hodin (výjimečně i s ní); nejčastější příčina smrti ve výšce), jinak kompletní uzdravení bez následků



69



Diagnóza HAPE

- Extrémní únava, slabost, kašel, dyspnea v klidu, hrudní kongesce
- Chraplavé dýchání, centrální cyanóza (rty, nehty), arteriální desaturace, tachykardie, tachypnea
- Horečka, růžové sputum
- Může se plést s IM, pneumonií a embolií (relat. častá kvůli dehydrataci a polycytémii) - myslet na to, nezlepší-li se stav sestupem



70

Mechanismsy HAPE

- Asi nerovnoměrná HPV → lokalizovaná hyperperfuze → ↑ tlak
- ↑ hypoxická plicní venokonstrikce
- Hypoxická permeabilita plicních kapilár
- Defekt Na-dependentní absorpce vody v dýchacích cestách (?)



71



Management HAPE

- Léčba:
 - **Okamžitý SESTUP !!!** (tam, kde naposled bez problémů)
 - O₂ (přenosná hyperbarická komora - ležet v ní může být problém)
 - Nifedipin (inhibice HPV, pozor na hypotenzi)
 - Dexamethason neúčinný
 - Acetazolamid **NE!** (↑ respirační acidózu působenou edémem)
- Prevence:
 - Pomalý výstup
 - ≥2 noci v 2500-3000 m před dalším výstupem
 - Nad 3000 m nespát >300-400 m výš než předchozí noc
 - β-agonisté (inhalace; ↑ Na-dependentní přestup vody)



72



Výškový edém mozku

- Vzácný, někdy společně s HAPE
- Po pokračování ve výstupu s akutní horskou nemocí
- Symptomy připomínají hypothermii (snadná záměna)
 - silná bolest hlavy
 - iracionalita, zmatenost, letargie
 - halucinace
 - cerebelární ataxie (chaotické pohyby jako při opilosti)
 - retinální krvácení



74



Výškový edém mozku

- Léčba:
 - okamžitý sestup!!!
 - O₂
 - dexametason
- Prognóza:
 - bez léčby fatální během hodin
 - s léčbou uzdravení obvykle bez následků



75

Základní pravidla do výšky

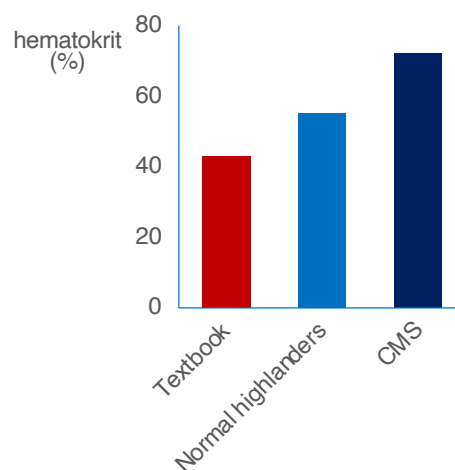
- Při akutní horské nemoci zastavit výstup!
- Při zhoršování okamžitý sestup!



76

Chronická výšková choroba

- ↑ polycytémie
- ↑ plicní hypertenze
- ↑ hypertrofie pravé komory
- městnavé selhání pravého ❤️



prevalence ~ 5-18 % nad 3 200 m n. m.

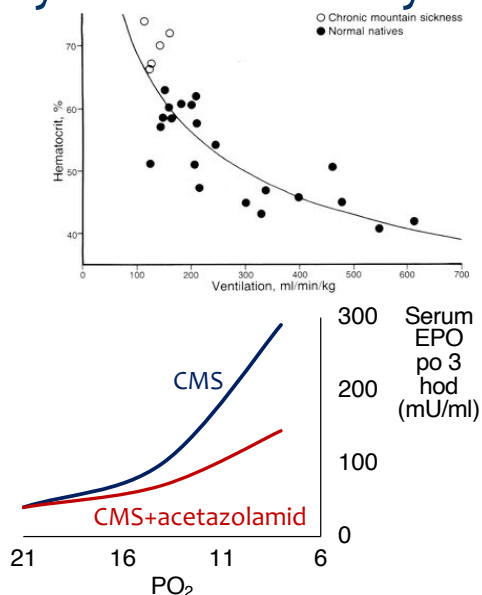
77

Příčiny chronické výškové choroby

- Ne úplně jasné
- Nedostatečná ventilace?
- Pomáhá acetazolamid
- Moc silná adaptace /aklimatizace?
(slabé mechanismy limitující adaptaci - NO, PGI₂, ...?)



78



Vysoký tlak: potápění

Taky tunelování
(přetlak proti prosakování vody)



79



Potápění – 2 různé situace/problémy

- potápění bez dýchání (freediving)

- hl. problém: hypoxie



- potápění s dýchacím přístrojem

- hl. problém: tlak



80

Jak dlouho vydrží pod vodou:



- Vorvani a delfíni: 2 hod
- Velryby a tuleni: 18 min
- Bobr, kachna: 15 min
- Krysa, králík, kočka, pes: 2-4 min



- Člověk: ~1 min



- Akvabely: PaO_2 30-35 mmHg
- Korejské lovkyně perel: 2 min (20-30 m, 20x/hod)
- Free divers: 8 min. 6 sec.
 - 170 m no limits
 - vlastní silou: Pipin Ferreras, Audrey Mestre, Martin Štěpánek, William Trubridge – přes 100 m



81



Free diving records

Constant Weight Apnea (CWT)	The athlete has to dive to the depth following a guide line that he is not allowed to actively use during the dive. The 'Constant Weight': the athlete is not allowed to drop any diving weights during the dive. Fins can be used	130 m 114 m	<u>Alexey Molchanov</u> <u>Alenka Artnik</u>	2018 2020
CWA Without Fins (CNF)	The same as CWT, but no fins	102 m 73 m	<u>William Trubridge</u> <u>Alessia Zecchini</u>	2016 2016
Free Immersion Apnea (FIM)	The athlete uses the vertical guiderope to pull himself down to depth and back to the surface. The athlete is still not allowed to release weights	125 m 98 m	<u>Alexey Molchanov</u> <u>Alessia Zecchini</u>	2018 2019
Variable Weight Apnea (VWT)	The athlete uses a weighted sled for descent. Athletes return to the surface by pulling themselves up along a line or swimming while using their fins	146 m 130 m	Stavros Kastrinakis <u>Nanja van den Broek</u>	2015 2015
No-Limits Apnea (NLT)	The athlete can use any means of breath-hold diving to depth and return to the surface, guideline used to measure the distance. Most use a weighted sled to dive down and inflatable bag to return	253 m 160 m	<u>Herbert Nitsch</u> <u>Tanya Streeter</u>	2012 2002



82

William Trubridge 101 m



83

Black-outs

- shallow water
 - $\uparrow$ ventilace před ponořením $\rightarrow \downarrow \text{CO}_2 \rightarrow$ hyperkapnický stimul pro nádech později než PO_2 poklesne pod potřebu mozku
- deep water (těsně před vynořením)
 - dole byl PO_2 OK, s vynořováním daná koncentrace O_2 v alveolech (a krvi) nestačí na dostatečný PO_2 pro mozek



84



Ploutvonožci

- 90% času pod vodou (až 1 hod, 3 min pauza)
 - 600 m a víc (tma, zima, tlak drtí lidské kosti)
- Přitom stejné orgány jako my
- U mláďat se schopnost potápění postupně rozvíjí
 - apnea jen několik min, dospělí až 25 min



87



Ploutvonožci

- Reflexní bradykardie (4/min), perfuse jen nezbytných orgánů
 - s expanzí hrudníku při vynořování naopak tachykardie (sinusová arytmie - receptory natažení v plicích): příprava na rychlý příjem O_2
 - sinusová arytmie u lidí - hysterické omdlávání fanynek
- Tlak ve 30-40 m vymáčkne vzduch z plic -> rychlé klesání (šetří energii)
- Ochlazení svalů (20 °C - u lidí by nefungovaly)
 - menší metabolismus, menší ztráty tepla
- Hodně krve, hodně vysoký htc a hodně Hb v RBC
 - jak se brání koagulaci a vysoké viskozitě?
- Dlouhé apnoické pauzy i při spánku na souši



88



Potápění s dýchacím přístrojem (SCUBA = self-contained underwater breathing apparatus)

- Tlak $\uparrow$ o 1 atm na každých 10 m
- Aby plíce nekolabovaly, musí vdechovaná směs přicházet pod $\uparrow$ tlakem



89



↑ tlak -> ↑ hustota plynu

- Proto ve 4 atm 2x ↑ práce dýchacích svalů na pohyb vzduchu dýchacími cestami
- Navíc potřeba hýbat vzduchem v přidaném mrtvém prostoru
- Spolu se zadržování dechu může vést k retenci $\text{CO}_2 \rightarrow$ bezvědomí
- He má ↓ hustotu než N_2



90

Vysoké PO_2

- Např. PO_2 v 40 m:
21% O_2 , 5 atm ~ 100% O_2 , 1 atm
- Tvorba O_2 radikálů ↑
přemůže buněčnou obranu
- Námaha to zhoršuje



91

Vysoké PO₂

- 60% O₂ při 1 atm:
 - OK i dlouho (dospělí)
- PO₂ ≤ 760 mmHg (100% O₂ při 1 atm)
 - pharyngitis, tracheitis po ~8 hod
 - pak atelektázy, plicní edém, ↓ mentální aktivita
- 100% O₂ při >1.7 atm (~30 min):
 - podrážděnost, nausea, závratě, svalové záškuby a křeče, poruchy vidění, dezorientace, bezvědomí



92

Dusíková narkóza

- Dýchání vzduchu ≥4-5 atm
- Podobné alkoholu: žovialita, euforie, zmatenost, ospalost, ↓ motorická koordinace a síla
- Rozpuštěním v buněčných membránách neuronů N₂ snižuje jejich dráždivost (stejně jako inhalační anestetika)



93

Dekompresní (kesonová) nemoc

- Při vynořování tvorba bublinek 20-700 μm v krvi a tkáních supersaturovaných plynem rozpuštěným během expozice $\uparrow$ tlaku
- Povrch bublinek je thrombogenní $\rightarrow$ vznik komplexů bublinky-proteiny-destičky
- Problémy, až když to plicní cirkulace nestačí odfiltrvat (PAP $\uparrow$ o ~ 20 mmHg)
- Bolesti svalů, kloubů; až i paralýza, kolaps, bezvědomí; dyspnea (často předchází vážnější problémy), plicní edém, embolie



94

Dekompresní nemoc

- Až po delší expozici
 - dusíku to trvá dlouho, než saturuje tělesné tekutiny (špatná rozpustnost)
 - zejména málo vaskularizovaný tuk (N_2 se v něm rozpouští nejvíc)
- Pohyb to zhoršuje
- He se hůř rozpouští než N_2
- Srdeční zkraty $\rightarrow \uparrow$ riziko (plíce nevychytají bublinky)



95



Dekompresní nemoc

■ Léčba:

- Rekompresa a pomalá dekomprese v hyperbarické komoře
- Lze zrychlit hyperbarickým O_2
 - nedodává se žádný další N_2
 - $\uparrow$ gradient N_2 mezi bublinkami a okolím
 - $\uparrow$ difuze O_2 do ucpaných oblastí

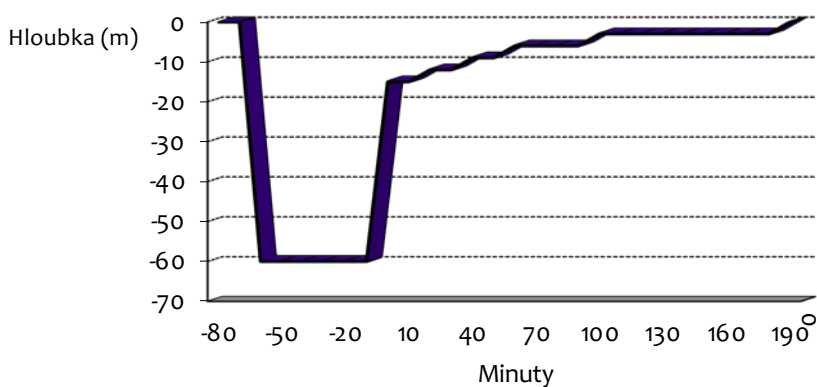
■ Prevence

- pomalé vynořování
- dny/týdny v přetlakové nádrži



96

Dekomprese po 1 hod v 60 m



97

He místo N₂

- ↓ hustota
 - ↓ dechová práce → ↓ retence CO₂
 - ↑ hlas → ↓ komunikace
- ↓ rozpustnost
 - ↓ narkotický účinek
 - ↓ dekompresní choroba
- ↑ tepelná vodivostnost
 - ↑ riziko podchlazení



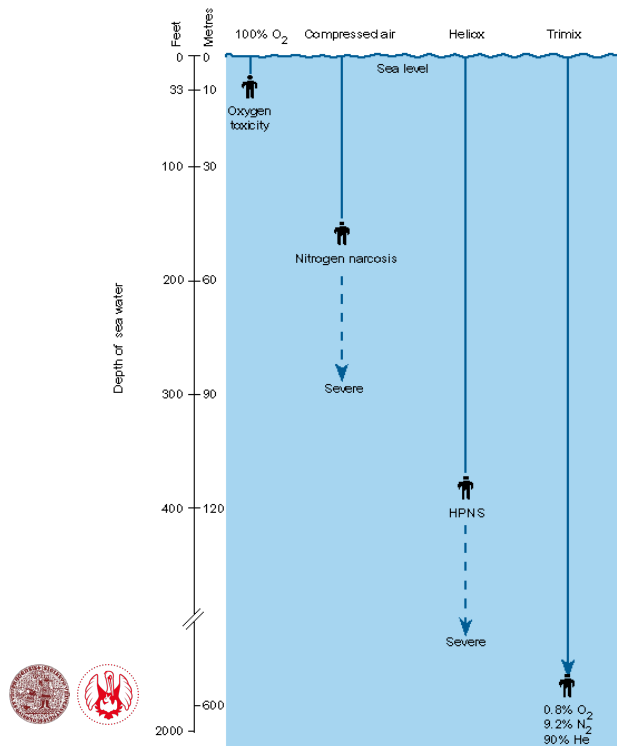
98

Vysokotlakový nervový syndrom (HPNS)

- Pod 130 m
- Hyperexcitace nervů tlakem
 - třes rukou
 - nausea, závratě
- Horší při rychlejším ponořování
- Omezují to tlumivé účinky N₂ (“Trimix”)



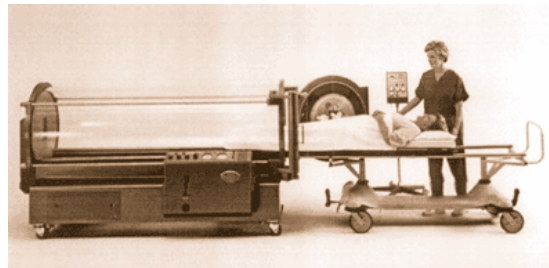
99



Hloubka potopení s různými plyny

100

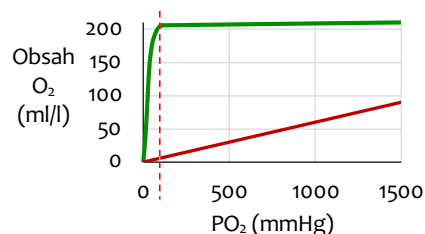
Vysoký tlak: přetlakové komory



101

Hyperbarická oxygenoterapie

- Intoxikace CO a kyanidy
- Vzduchová embolie
- Anaerobní infekce
- Traumatická ischemie (crush syndrom)
 - po těžkém zranění končetiny a jejího oběhu, často s infekcí
- Ischemická choroba dolních končetin



102

Barotrauma

Změnou objemu plynu tam, kde se nevyrovná tlak s okolím:

- nosní dutiny
- zubní kazy
- střední ucho (při ucpání Eustachovy trubice)
- střevní plyny
- alveoly
 - pokud se při vynořování nevydechuje
 - přílišné tlaky při mechanické ventilaci



103

Ponorky



- Nouzový únik
- Vnitřní prostředí
(např. CO v kouři z
cigaret)



104



Nouzový únik z ponorky

- Ze 100 m lze bez ničeho
- Při výstupu plyn v plicích expanduje
- Proto nutno pořád exhalovat
- To odstraňuje $\text{CO}_2 \rightarrow$
↓ potřeba nadechnutí



105



JAK PŘEŽÍT TAM, KAM BY ANI PSA NEVYHNAL
I O PRÁZDNINÁCH MŮŽETE ZAŽÍT EXTRÉMNÍ SITUACE

Emeritní rektor Univerzity Karlovy
Prof. RNDr. Václav Hampl, DrSc.

23. 6., 18:00 • www.ct24.cz

<http://www.ceskatelevize.cz/porady/10000000085-univerzita-karlova-on-line/214251000750022-jak-prezit-tam-kam-by-ani-psa-nevyhnal/video/>

106



107

Gravitační přetížení

- Rakety (3-9 G), letadla, pády z výšky, srážky
- G = násobek normálního gravitačního přetížení
- + přetížení od hlavy k nohám,
- opačně



108

Pozitivní podélné G

- Člověk vydrží v sedě:
 - 4 G asi 40-50 sec
 - 15-20 G asi 1 sec
(ve stoje míň, vleže trochu víc)



109

Pozitivní podélné G

2 G:

- těžké, hůř ovládané končetiny

3-4 G:

- vzpřímená poloha je problém
- udržet otevřené oči je namáhavé
- dýchání je namáhavé

4-6 G:

- gray-out za několik vteřin, pak black-out

20 G:

- fraktura obratlů



110

“Gray-out/black-out”

+5G: tlak v žilách nohou 450 mmHg

- distenze žil nohou a břicha
- přesun krve dolů
- drasticky ↓ žilní návrat
- tlak krve ↓ (k ~20 mmHg; přechodně, pak to částečně upraví baroreceptory)
- odkrvuje se mozek a sítnice
- zšednutí zorného pole
- po desítkách sec ztráta vidění, pak vědomí



111

Pozitivní podélné G

- Trochu pomáhá anti-G oblek
 - tlačí vodou nebo motorizovanými polštáři na nohy a břicho
 - nezabrání posunu srdce a bránice směrem k břichu (proto limit ~ 10 G)
- Trénink:
 - komprese břicha předklonem a stahem břišních svalů
 - ↑ nitrohruční tlak



112

Pozitivní příčné G

- Start rakety skoro 10 G (raketoplán 4G)
- Největší tolerance G je vleže (10-17 G až 3 min)
- Nejvíce namáháno dýchání
 - hypoventilace



113

Negativní G

- Hlavně letecká akrobacie
- Snáší se hůř než + G
- Vysoké tlaky v mozkových cévách
 - i když proti působí stejným směrem centrifugovaný mozkomíšní mok
 - to ale neplatí pro sítnici - proto red-out
- Otok obličeje, nebezpečí krvácení do mozku



115

"Red-out"

- Nával krve do sítnice
- Zčervenání zorného pole
- Rychle následuje ztráta vidění



116



117

Beztíže (mikrogravitace)



Denis Tito v beztíži

- Vnímání polohy
- Přesuny vody
- Kostí a svaly



118

Starosti při vesmírném letu

- Přetížení při startu a návratu
- Beztíže
 - na oběžné dráze ~200 km zbytek gravitace vyvažován odstředivou silou
- Radiace
 - ale třeba při letech Appolo menší než při rtg vyšetřeních
 - při delších letech horší



119

Vnímání polohy

- Střední ucho
 - polokruhovitě kanálky
 - otholity
- Mechanoreceptory ve svalech a šlachách
- Taktilní receptory v kůži (hl. ploska nohy)
- Vizuální podněty



120

Vnímání polohy v beztlíži

- Disociace gravitačně závislých a vizuálních vjemů
- Poruchy prostorové orientace
 - „Cloumání s raketou“ místo kliků
 - Náhlý obrat vzhůru nohama při vstupu do beztlíže
 - Posléze: dole je tam, kde jsou nohy
- Syndrom adaptace na vesmír



121

Syndrom adaptace na vesmír

- „Mořská“ nemoc z nesouladu mezi vizuálními, taktilními a gravitačními vjemy
- Nechutenství, pocení, závratě, bolest hlavy, poruchy soustředění, nevolnost, zvracení
- Začíná po 1 hod - 2 d
- Trvá až 4 dny, odeznívá spontánně
- Asi u 50% astronautů
- Dá se simulovat „virtuální realitou“



122

Přesuny vody

- Voda se přesunuje ↑ (hlava, hrudník)
- Každá noha ztrácí ~ 1l tekutiny (10% objemu) během 1. dne
- Napomáhá tomu ↑ objemu hrudníku (↓ váha jeho stěny)
- Otok obličeje, nosní kongesce, "rýma" po celou dobu beztíže
 - proto astronauti před letem málo pijí



123

Přesuny vody v beztíži

- ↑ objem krve v hrudníku
→ ↑ tepový objem a srdeční výdej
 - CO ale posléze ↓
(neaktivní svaly ho méně potřebují)
- distenze atrií → ↑ ANP → ↑ diuréza
„koriguje“ vnímanou hypervolémií



124

↑ H₂O v horní polovině těla

- ↑ tlak v renálních arteriolách
- ↑ glomerulární filtrace (až +20%)
 - ↓ RAS
- ↓ aldosteron → ↓ objem plasmy (o 10-20%)
dehydratace tkání
 - Normalizuje se brzy po návratu
 - Nejdřív ale ortostatická intolerance
(↓ tepový objem ve stoje, protože ↓ objem krve a
přesunuje se do nohou)



125

Přechodná anémie

- ↓ hematokrit (o 15% za 2 týdny)
- Po 2 měsících téměř normalizace
- Nejdříve dehydratace → ↑ relativní hematokrit
→ ↓ erythropoesa
(↓ potřeba O₂ kvůli ↓ aktivitě svalů)
- Krvinky dokonce nejasným způsobem odbourávány



126

Hematokrit po návratu

- Nejdříve dále ↓
(normalizuje se objem plasmy)
- Pak normalizace během několika týdnů



127

Srdce v beztíži

- ↓ objem krve
- ↓ namáhavost pohybu a postoje
- ↓ nároky na srdce
- ↓ velikost a výkonnost srdce

- Normalizace během pár týdnů po návratu



128

Kosti a svaly

- Kosmonauti "povyrostou"
(na páteř nic netlačí)
- Ztráta asi 1-1.5 % kostní hmoty
(a Ca^{2+}) za měsíc po celou dobu letu
- Usilovné cvičení to nezastaví, jen trochu zpomalí
 - nejúčinnější je běhátko s nohama v podtlakové komoře



129

Ztráta kostní hmoty

- Zastavuje se až asi měsíc po návratu
- Ne zcela reverzibilní ???
- Osteolýza: $\uparrow \text{Ca}^{2+}$ v plazmě
→ $\uparrow$ riziko ledvinových kamenů



130

Svaly v beztíži

- Atrofují
- Pomalé (na podporu váhy těla) se mění na rychlé
- ↓ myosin
- ↓ proteosyntéza
- Ve svalech ubývá cév a nervových zakončení



131

Spánek

- mizí chrápání a poruchy spánku dané špatnou průchodností horních dých. cest
- přitom kosmonauti spí míň
 - možná proto, že spí líp?



132

Re-entry

- Hl. problém: ortostatická intolerance
 - ↓ objem krve
 - ↓ arteriální tonus v nohách
- rozumná normalizace během hodin



133



134

Suché horko

- Typicky pouště (1/5 souše), ale i jinde
- Člověk se zřejmě vyvinul v aridních končinách
- Na slunečné pláži u moře je 4x víc radiace (odražené) než na louce



135

Řízení termoregulace

- Hypothalamická centra
 - přední - odpověď na teplo
 - zadní - odpověď na chlad
- Senzory teploty krve v hypothalamu a velkých cévách
- Sympatikus:
 - periferní arterioly (NA)
 - potní žlázy (ACh)



136

Ztráty tepla

- Vedením
 - málo účinné z hlubších vrstev
- Radiací
- **Vypařováním**
 - vlhkost kůže, potní žlázy
 - kožní vazodilatace
(↑ srdeční výdej, konstrikce splachniku → GI obtíže)
 - funguje i při teplotě těla > teplota okolí



137

Další mechanismy

- Ztráta tepla vypařováním respirace u lidí málo významná
(jen minimální ↑ respirace)
- ↓ tepelné produkce snížením aktivity
je až 2. obrannou linií



138

Adaptace na horko

- Během 1-3 týdnů
- ↑ kardiovaskulární výkonnost
- ↑ RAS
- ↓ ztráty NaCl potem a močí (↑ aldosteron)
- ↑ objem plasmy
- ↑ maximální schopnost pocení (2x)



139

Hyperthermie

- Krátkodobě 43°C (hypothalamus) - OK (dospělí)
- Delší dobu nad 40°C → poškození hypothalamického centra → selhání thermoregulace
- Přehřátí → ↑ metabolismus → ↑ přehřátí
- 45 °C smrt skoro jistá
- nad 50 °C dekompozice buněk a tkání



140

Hypertermie

- Tepelné vyčerpání
 - mírnější problém z deplece vody a solí
 - žízeň, slabost, úzkost,...
 - teplota jádra $<40^{\circ}\text{C}$
- Termoregulační selhání
 - život ohrožující
 - teplota jádra $> 40^{\circ}\text{C}$ + dysfunkce CNS (nervy jsou na hypertermii nejcitlivější):
 - apatie, zmatenost, podrážděnost, hostilita, bolest hlavy, nausea/zvracení, připomíná opilost
 - nakonec delirium, křeče, koma



141

Termoregulační selhání

- Víc tepla, než se tělo dokáže zbavit
 - hodně tepla z venku
 - velká vlastní tvorba tepla
- Často fatální nebo dlouhodobé neurologické následky
- Hypotenze (z dehydratace) -> omdlévání
- Tachykardie, tachypnea (pokus o kompenzaci hypotenze)
- Kůže nejdřív červená (vazodilatace pro dissipaci tepla), později bledá (vazokonstrikce pro kompenzaci hypotenze)
- Hypoperfuze GIT + jeho teplem zvýšený metabolismus -> ischemické poškození bariérové funkce -> endotoxemie -> cytokiny, aktivace koagulace, další zhoršení termoregulace



142

Riziko termoregulačního selhání

- staří
- děti
- osamělí
- mentálně postižení
- neschopnost zvýšit srdeční výdej (do kůže a kvůli teplem zvýšenému metabolismu)
 - choroby, léky (diuretika)
- na kokainu, amfetaminech,...



143

Co s tím

- Ochladit
 - led na krk, podpaží, břicho, omývání kůže studenou vodou - ne ledovou, aby se nedělala vazokonstrikce
- Expanze plasmy (voda, soli)
- Léčit orgánová selhání
 - respirační, cirkulační, renální



144



145

Vlhké horko

- V deštných pralesích (30 % souše) poměrně málo domorodců, asi tam zahrnutí úspěšnější konkurencí
- Malé variace teploty vzduchu okolo teploty kůže, humidita 70-100%, bezvětří, ale málo přímé sluneční radiace
- Přizpůsobení mnohem obtížnější než na suché horko (neúčinnost pocení)



146



147

Chlad

- ↑ svalový tonus (↑ tepelné produkce)

- Třes - klíčový

- současné záškuby antagonistických svalů
- ↑ tvorbu tepla 2-3x
- při adaptaci se víc třesou svaly uvnitř těla - efektivnější ohřívání jádra

- Netřesová termogeneze



148

Periaortální BAT

- i u lidí umí významně ohřívat protékající krev (při SNS aktivaci)
- rozpřažení oxidativní fosforylace
thermogeninem → akumulace ATP nebrzdí
exotermní reakce elektrontransportního řetězce



149

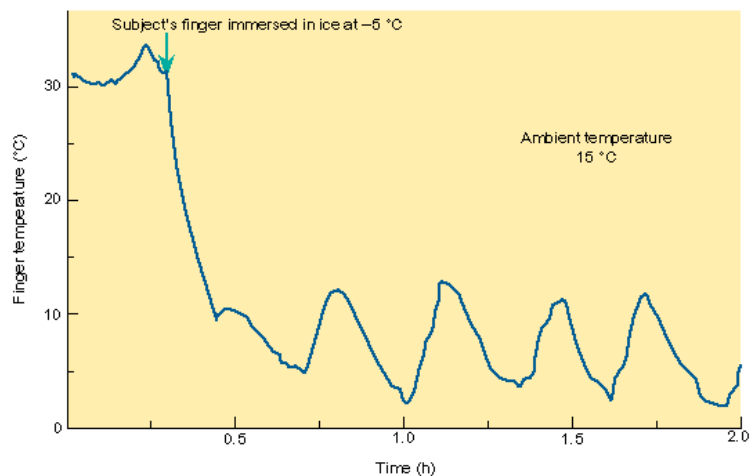
Periaortální BAT

i u lidí umí významně ohřívat protékající krev
(při SNS aktivaci)



150

“Hunting phenomenon”



151

Raynaudův fenomén

- Maurice Raynaud 1862
- zmodrání prstů v chladu
- přechodná ischemie prstů



152