

Naslov članka/Article:

Moč človeka

Power of Man

Avtor/Author:

dr. Marko Marhl, dr. Vladimir Grubelnik, dr. Jan Zmazek

CC licenca



Priznanje avtorstva-Nekomercialno-Brez predelav



Fizika v šoli 1/2023, letnik 28

ISSN 1318-6388

Izdal in založil: Zavod Republike Slovenije za šolstvo

Kraj in leto izdaje: Ljubljana, 2023

Spletna stran revije:

<https://www.zrss.si/strokovne-revije/fizika-v-soli/>

Moč človeka

dr. Marko Marhl,^{1,2,3} dr. Vladimir Grubelnik,⁴ dr. Jan Zmazek^{3,5}

Univerza v Mariboru: ¹Pedagoška fakulteta, ²Medicinska fakulteta, ³Fakulteta za naravoslovje in matematiko, ⁴Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko; ⁵Znanstveno in inovacijsko središče Pomurje

Izvleček

V članku je predstavljena moč človeka, ki jo z energijskega vidika primerjamo z močjo Sonca in bakterij. Ugotovimo, da je moč, preračunana na gram mase telesa, največja pri bakterijah, sledi človek in na zadnjem mestu se presenetljivo znajde Sonce. Faktorji so prepričljivi in so reda velikosti nekaj tisoč. Velikansko moč človeka predstavimo še z biofizikalnega vidika, tako da moč našega telesa preračunamo na število genov in ugotovimo, da močno prekašamo prej zmagovalne bakterije. Poleg te velike učinkovitosti našega telesa opozorimo še na izjemno sposobnost regulacije energijskih tokov, ki poteka po različnih presnovnih poteh in z različnimi visokoenergijskimi molekulami; poleg najbolj poznane ATP spoznamo še NADPH.

Ključne besede: energija, moč, celična presnova, ATP, NADPH

Power of Man

Abstract

The article compares the power of man with the power of the Sun and bacteria. Bacteria have the highest power per gramme of body mass, followed by man and finally, quite surprisingly, by the Sun. The factors are significant - their order of magnitude is several thousand. If we put the enormous power of man into a biophysical context by calculating the power of our body per number of genes, man is far superior to the hitherto triumphant bacteria. In addition to the high power of the human body, the article also addresses its remarkable ability to regulate energy flows through various metabolic pathways and energy-rich molecules and introduces NADPH in addition to the well-known ATP.

Keywords: energy, power, cell metabolism, ATP, NADPH.

Uvod

Moč je fizikalna količina, ki nam pove, koliko dela lahko opravimo v določenem času, ali v splošnem, koliko energije preteče v nekem časovnem intervalu. Človeško telo je sistem, v katerem se pretakajo številni energijski tokovi, ki so povezani s snovnimi, električnimi in toplotnimi tokovi. Za vzdrževanje bitja srca, dihanja in drugih osnovnih življenjskih funkcij, ki jih opravljajo organi, je potrebna energija, ki jo pridobimo s presnovo oz. z metabolizmom. Veliko energije porabimo za segrevanje našega telesa, približno 20 % celotne energije, ki jo prejmemo s hrano (Rolfe in Brown, 1997). Veliko te energije oddamo s sevanjem, zato je zanimivo preučiti, kolikšna je moč sevanja v primerjavi z drugimi telesi, ki jih v fiziki dobro poznamo. V tem članku bomo primerjali sevanje človeškega telesa s sevanjem Sonca. Veliko moč Sonca občutimo, ko uživamo tople poletne dni, saj takrat intenzivno osvetli severno poloblo in nas prijetno ogreje. Ugotovimo, da je človeško telo presenetljivo intenziven sevalec. Na Zemlji obstajajo organizmi, preprosti enoceličarji, kot so bakterije, ki so še intenzivnejši sevalci, kar nam pokaže izsevana moč na gram telesne mase, pri čemer je treba opozoriti, da so moči, preračunane na genom in s tem na kompleksnost organizma, pri bakterijah mnogo manjše kot pri človeku. S tem pridemo do spoznanja, da je naše telo res nekaj posebnega zaradi evolucijsko dosežene kompleksnosti in velikanske energijske moči.

Naše telo je res nekaj posebnega zaradi evolucijsko dosežene kompleksnosti in velikanske energijske moči.

Človeško telo in Sonce

Izsevalni tok Sonca lahko določimo na podlagi njegovega sevanja. Sonce lahko obravnavamo podobno kot sevanje črnega telesa, pri čemer se pojem »črno telo« ne navezuje na barvo, ki jo

vidimo v vidnem delu izsevanega spektra. Sonce ima namreč značilno porazdelitev termičnega sevanja po valovni dolžini, ki sovпада s sevanjem črnega telesa (Kladnik, 1989). Opisal jo je Max Planck in je odvisna le od temperature telesa. Če poznamo temperaturo telesa, lahko gostoto celotnega izsevanega toka (j) izračunamo s Stefan-Bolzmannovim zakonom (Kladnik, 1989). Glede na to, da je temperatura površja Sonca približno 5800 K, je gostota izsevalnega toka Sonca enaka:

$$j = \sigma T^4 = 6,4 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2,$$

pri čemer je Stefanova konstanta: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$.

Gostoto izsevanega toka pomnožimo s površino Sonca (pri tem upoštevajmo polmer sonca $r = 0,69 \cdot 10^9 \text{ m}$) in dobimo izsevalno moč Sonca:

$$P = j \cdot S = j \cdot 4\pi r^2 = 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}.$$

Dobljena vrednost izsevalne moči Sonca je izredno velika, o čemer priča tudi dejstvo, da kljub majhnemu deležu te moči, ki ga prestreže Zemlja ($1,3 \cdot 10^{17} \text{ W}$), predstavlja nenadomestljiv vir energije. Če bi namreč želeli to energijo nadomestiti z jedrskimi elektrarnami, bi jih morali na Zemlji zgraditi kar okoli $2 \cdot 10^8$. To je seveda tudi teoretično nemogoče, saj bi že v Sloveniji potrebovali okoli 10.000 jedrskih elektrarn.

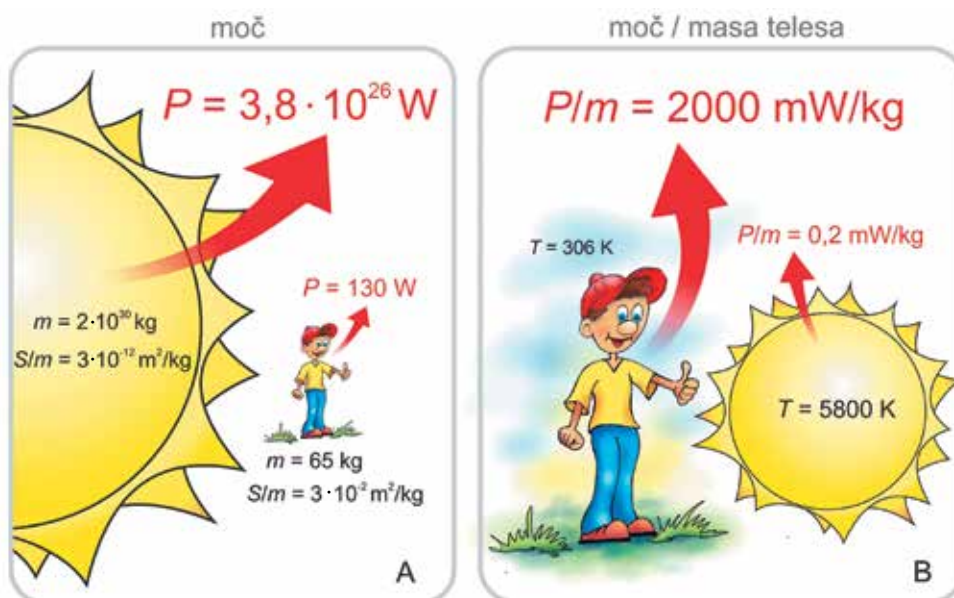
Glede na to, da Sonce oddaja ogromno izsevalno moč, je treba poudariti tudi, da ima Sonce izredno veliko maso $m = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$. Če preračunamo izsevalno moč Sonca glede na njegovo maso, dobimo le $0,2 \text{ mW/kg}$ oziroma $2 \cdot 10^{-4} \text{ mW/g}$.

Primerjajmo dobljeni rezultat z izsevano močjo človeka. Podobno kot pri Soncu tudi za človeka predpostavimo preprost primer oddajanja toplote s sevanjem. Če predpostavimo, da je površina človeškega telesa $S = 1,7 \text{ m}^2$, povprečna temperatura gole kože $T = 33^\circ \text{C}$ in temperatura okolice $T = 20^\circ \text{C}$, ugotovimo, da človek s sevanjem oddaja toplotni tok:

$$P = S\sigma(T^4 - T_0^4) = 134 \text{ W}.$$

Pri različnih pogojih se sevalni tok človeka seveda spreminja, na primer oblečena oseba izgubi le 50 % toplote s sevanjem, ostalo pa s konvekcijo, izhlapevanjem in izmenjavo toplote z dihanjem. Rezultat je torej le približna ocena, ki v velikostnem razredu ustreza potrebam po vnosu energije s hrano. Povprečna potreba odraslega človeka je namreč okoli 2500 kilokalorij na dan, kar predstavlja približno 10,5 MJ/dan oziroma toplotni tok okoli 120 W.

Izsevalna moč Sonca je izredno velika ($3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$).



Slika 1: Moč enega grama človeka presega izsevalno moč enega grama Sonca za faktor 10.000. Pri tem sta pomembna razmerje med površino in maso (S/m), ki je pri človeku večje za faktor 10^{10} , in površinska temperatura, ki je pri človeku manjša za približno 19-krat. (Avtor slike: Vladimir Grubelnik)

Izrazimo sevalni tok človeka še glede na maso človeka in ga primerjajmo s sevalnim tokom Sonca. Ob upoštevanju, da človek z maso 65 kg seva toploto z močjo približno 130 W, to predstavlja 2 W/kg. Primerjava s sevalnim tokom Sonca nam pokaže, da je to kar za faktor 10^4 več kot pri Soncu. Čeprav ima torej Sonce večjo izsevalno moč kot človek (glej zgornji izračun in sliko 1 A), je sevalni tok, preračunan na maso telesa, veliko večji pri človeku kot pri Soncu (glej sliko 1 B).

Treba je poudariti, da je ta primerjava sevalnih tokov na maso telesa relevantna le, če želimo primerjati celotno strukturo Sonca, ki je potrebna, da se v notranjosti Sonca ustvarijo razmere za potek jedrskih reakcij, s celotno strukturo človeškega telesa, ki je potrebna, da lahko človek živi v danih razmerah. Upoštevanje le dela sončeve in človeške mase, ki proizvaja toploto, prej izmerjeno razmerje precej spremeni, izračuni pa zaradi nehomogenosti teles postanejo kompleksnejši, česar na tem mestu ne bomo podrobneje obravnavali.

Za konec le še pojasnilo, zakaj mora homogeno telo, ki ima večje razmerje med površino in maso (S/m), pri dani površinski temperaturi T proizvesti več energije na maso telesa (W/kg). V stacionarnem stanju sta proizvedeni (P) in izsevani (P_i) energijski tok enaka. Upoštevajmo, da je proizvedeni energijski tok sorazmeren z maso telesa: $P = k \cdot m$, izsevani energijski tok pa je glede na Stefanov zakon odvisen od površine in temperature telesa: $P_i = S\sigma(T^4 - T_0^4)$. Če tokova izenačimo in delimo z maso, dobimo energijski tok na maso telesa:

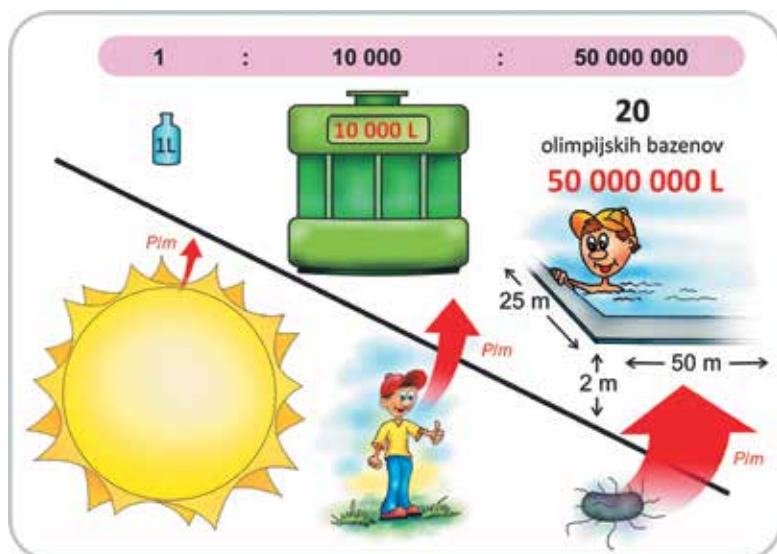
$$\frac{P}{m} = \sigma \left(\frac{S}{m} \right) (T^4 - T_0^4),$$

ki je pri dani temperaturi odvisen od razmerja S/m . Ko primerjamo človeka s Soncem (slika 1), je razmerje S/m pri Soncu za kar 10^{10} manjše kot pri človeku. Zaradi precej različnih površinskih temperatur pa izsevana moč na maso telesa pri Soncu v primerjavi s človekom ni za tolikšen faktor manjša. Če v zgornji enačbi poleg izračunanega razmerja S/m upoštevamo še različne temperature človeka in Sonca, ugotovimo, da je izsevni tok na maso telesa (P/m) pri Soncu za faktor 10^4 manjši kot pri človeku, kar smo predhodno tudi pokazali.

Človek in bakterije

Ob ugotovitvi, da je moč človeka veliko večja od izsevalne moči Sonca, povejmo še, da človeško telo ni edini organizem na Zemlji, ki je energijsko zelo učinkovit. V literaturi zasledimo podatke o številnih bakterijah, ki lahko proizvedejo ogromne količine energije na gram telesne mase. Poznamo bakterije, t. i. *Azotobacter*, ki prekašajo izsevalno moč Sonca, preračunano na gram mase, celo za 50-milijonkrat, kar je še mnogo več, kot je moč človeka na gram telesne mase (slika 2).

Sevalni tok, preračunan na maso telesa, je kar za faktor 10^4 večji pri človeku kot pri Soncu.



Slika 2: Izsevalne moči na gram mase pri Soncu, človeku in bakteriji so v razmerju 1 : 10.000 : 50.000.000, kar ustreza primerjavi prostornin plastenke (1 l), cisterne za vodo (10.000 l) in 20 olimpijskih bazenov (50.000.000 l). (Avtor slike: Vladimir Grubelnik)

Bakterije živijo na Zemlji mnogo dlje kot človek, saj so se razvile pred skoraj štirimi milijardami let. Celice, ki imajo jedro in celične organele, torej celice, ki so podobne celicam v človeškem telesu, pa so se razvile šele pred približno dvema milijardama let. Glede na to, da so imele bakterije v primerjavi s človekom kar dvakrat več časa za evolucijo, bi lahko pomislili, da imajo bolj prefinjene mehanizme pridobivanja energije kot človek. Pa je res tako?

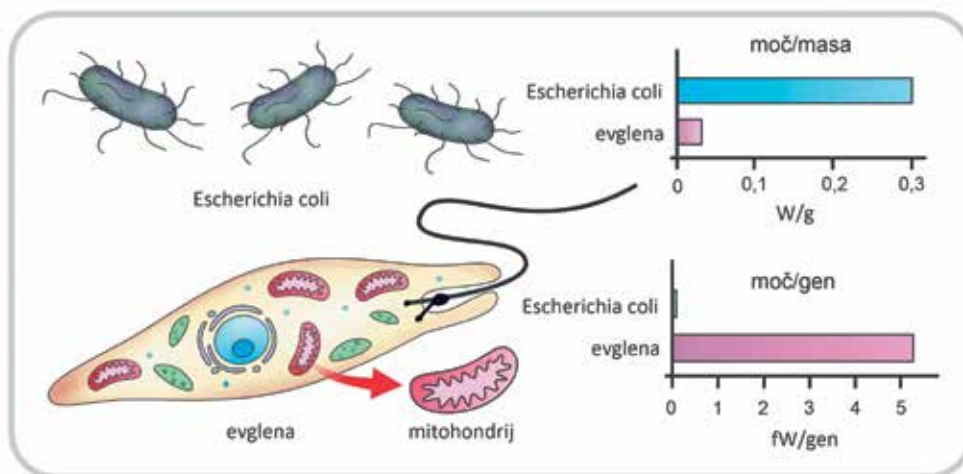
Moč človeškega telesa, normirana na genom

Pri razmisleku, kdo je zmogljivejši, mi ali bakterije, se izračuna lahko lotimo tako, da našo energijsko zmogljivost, našo moč, preračunamo glede na kompleksnost organizma, saj kompleksnejši organizmi potrebujejo več energije za delovanje. Kompleksnost organizma lahko izrazimo z genskim zapisom, številom genov, kar opravičuje preračun energijske zmogljivosti na gen (Lane, 2015; Lane in Martin, 2010).

Človek ima približno 200.000-krat več genov kot bakterije. S tem lahko celice v našem telesu izdelajo veliko različnih beljakovin, kar pa je energijsko zahtevno, saj se za izgradnjo beljakovin porabi največji delež energije v obliki adenozin trifosfata (ATP), ki ga proizvedemo iz zaužite hrane, približno 25–30 % (Rolfé in Brown, 1997). Sicer molekule ATP zagotavljajo energijo še za večino drugih procesov v naših celicah, kot so krčenje mišic, prenašanje živčnih pulzov itd. Za razliko od človeka so bakterije precej manj kompleksne, kar jim omogoča hitro delitev, saj pri delitvi porabijo manj energije, in kar je še posebej pomembno, manj gradnikov.

Pokazali smo, da so bakterije dejansko energijsko zelo zmogljive, če njihovo moč preračunamo na gram. Poleg že omenjene bakterije *Azotobacter* je energijsko zelo učinkovita tudi ena najbolj poznanih in preučevanih bakterij *Escherichia coli*, ki za večkratnik prekaša evgleno, kot to prikazuje slika 3. Poudarimo, da je evglena enoceličar, torej ena celica, ki je po strukturi podobna naši, ima jedro in celične organele. Posebej pomembni so celični organeli mitohondriji, ki so poleg številnih funkcij najbolj poznani kot proizvajalci energije (»celične elektrarne«), kjer se proizvede večina ATP v naših celicah.

Preračun energijske zmogljivosti na gen pokaže, da človek kljub precej večjemu številu genov v primerjavi z bakterijami proizvede bistveno večje moči, preračunane na gen. Ker smo proizvodnjo energije preselili na naše celične organele mitohondrije, ki najverjetneje izvirajo iz nekdanj prostoživečih bakterij, smo uspeli doseči velikanske moči, preračunane na gen, kar lahko vidimo tudi na primeru evglene na sliki 3.



Slika 3: Moč, preračunana na genom, je pri človeku mnogo večja kot pri bakterijah, kar lahko razberemo iz evglene kot primera enoceličnega organizma. (Avtor slike: Vladimir Grubelnik)

Urnavanje proizvodnje energije v mitohondrijih je eden najpomembnejših preskokov v evoluciji življenja na Zemlji. Mitohondriji za urnavanje energijskih procesov potrebujejo zelo malo genetskega zapisa. Ohranili so samo 37 genov za sintezo 13 proteinov, preostali

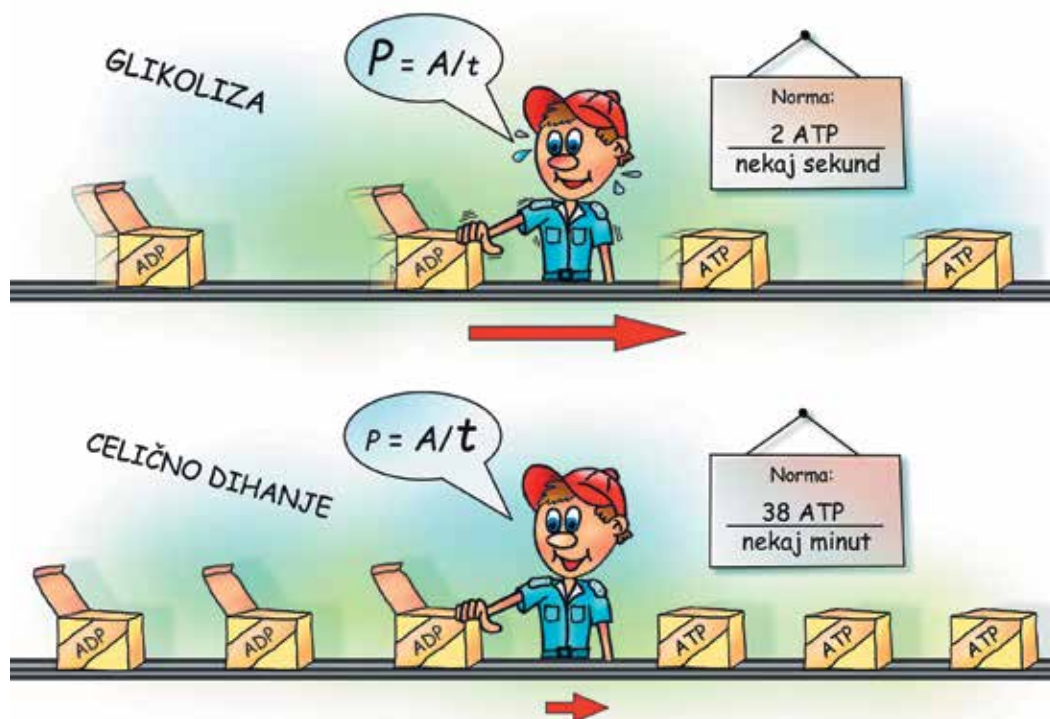
Številne bakterije lahko proizvedejo ogromne količine energije na gram telesne mase.

Urnavanje proizvodnje energije v mitohondrijih je eden najpomembnejših preskokov v evoluciji življenja na Zemlji.

genetski material, ki so ga imeli kot samoživeči bakterijski organizmi, pa so predali jedru naših celic (Lane, 2015; Lane in Martin, 2010). To je bil tako velik preskok v evoluciji, da mu lahko rečemo edinstven in ključen predvsem z energijskega vidika, kar je omogočilo razvoj kompleksnega življenja na Zemlji.

Regulacija moči človeškega telesa

Človeško telo je zelo kompleksno, mehanizmi produkcije celične energije pa omogočajo številne prilagoditve okolju in s tem potrebam človeškega organizma. Celice v človeškem telesu lahko pridobivajo energijo v obliki visokoenergijskih molekul, kot je npr. ATP, iz več hranil, predvsem iz glukoze, maščob in beljakovin. Iz glukoze lahko pridobimo ATP na dva načina, in sicer z glikolizo ali s celičnim dihanjem. Glikolizo poznamo predvsem po njenem delu fermentacije, ki poteka brez kisika, npr. pri glivah kvasovkah, ki s tem povzročajo vretje mošta. Dejstvo je, da z glikolizo dobimo zelo malo energije, iz ene molekule glukoze dobimo le dve molekuli ATP, pri celičnem dihanju, ki vključuje še nadaljnjo razgradnjo glukoze in pri katerem se porablja kisik, pa tudi do 38 (v realnosti med 30–36 molekul). Pomislili bi, da je celično dihanje edina smiselna pot, saj nam daje veliko več energije, fermentacija pa daje občutek potratnosti. Pa vendar odgovor ni preprost. Res je, da s celičnim dihanjem dobimo veliko več energije, vendar je čas, ki je za to potreben, veliko daljši. Groba ocena je, da se to (odvisno od celic in stanja v celicah) zgodi v minutah, medtem ko glikoliza poteče v nekaj sekundah. Torej, povedano fizikalno, moč glikolize je večja kot moč celičnega dihanja. To si lahko ponazorimo z delom za tekočim trakom, kot prikazuje slika 4. V prvem primeru (glikoliza) napolnimo dve škatli v nekaj sekundah, v drugem primeru (celično dihanje) pa 38 škatel v nekaj minutah, kar pomeni, da smo v prvem primeru trošili večjo moč.



Slika 4: Različne moči glikolize in celičnega dihanja, ponazorjene z delom za tekočim trakom. V zgornjem primeru (glikoliza) zapremo dve škatli v nekaj sekundah, v spodnjem primeru (celično dihanje) pa 38 škatel v nekaj minutah. (Avtor slike: Vladimir Grubelnik)

V realnosti celice velikokrat preklopijo iz »varčnega« celičnega dihanja v »potratno« glikolizo, še posebej, ko v kratkem času potrebujemo veliko energije. Verjetno najbolj poznamo primer mišičnih celic, ki pri velikih obremenitvah ali znižani koncentraciji kisika preklopijo na »veli-

Celice velikokrat preklopijo iz »varčnega« celičnega dihanja v »potratno« glikolizo, še posebej, ko v kratkem času potrebujemo veliko energije.

ke moči« glikolize. Pravimo, da se nam pri velikih obremenitvah v kratkem času mišice »zakisajo«, kar je na nek način res, saj je stranski produkt glikolize – fermentacije – mlečna kislina, ki povzroči pekočo bolečino v mišicah ob velikem naporu. Seveda je treba upoštevati, da lahko mlečno kislino, ali pa vsaj večji del nje, telo ponovno uporabi. Po krvi potuje mlečna kislina v jetra, kjer se porabi za izdelavo glukoze (kar imenujemo Corijev cikel), ali pa se v močno prekrvljenih tkivih, kot so npr. srce ali ledvice, ki so bogata s kisikom, porabi za pridobivanje ATP (Vazquez, 2017). Ko se nam torej ob intenzivni vadbi zviša koncentracija mlečne kisline v krvi, pravimo, da smo v mlečnokislinskem ali laktacidnem kisikovem dolgu. To občutimo z zadihanostjo še nekaj minut po končani vadbi, saj s pospešenim dihanjem vnašamo v telo več kisika, ki je potreben za presnovo mlečne kisline v omenjenih tkivih. Čeprav ti procesi presnove niso ravno enostavni, si lahko na primeru delovanja mišic dokaj preprosto ponazorimo, kako deluje naša »fina regulacija moči«, ko telo potrebuje več energije v kratkem času ali pa ima možnost, da lepo »počasi« in v miru z oksidacijo pridobiva energijo z velikimi izkoristki.

Mišične celice pa niso edini primer regulacije moči, s katero naše telo pridobiva energijo glede na potrebe našega telesa. S »preklopom« na glikolizo se odzove tudi naš imunski sistem, ki z veliko močjo v zelo kratkem času proizvaja nujno potrebno energijo in gradnike za delitev celic. Imunske celice si lahko predstavljamo kot vojake, ki jih moramo ob okužbi z virusi, bakterijami, glivami in paraziti, ko se naše telo znajde v zagati, zelo hitro namnožiti (Vazquez, 2017).

Celice v našem telesu pa nam lahko tudi zelo ponagajajo. Takšen primer so rakave celice, ki prevarajo naše telo in se »egoistično« delijo ter pri tem zelo hitro, z veliko močjo glikolize, porabljajo našo glukozo; pojav je že v 20. letih prejšnjega stoletja preučeval Otto von Warburg in je danes poznan kot Warburgov pojav. Pri rakavih celicah seveda energijski procesi niso tako zelo preprosti, saj poleg velike količine energije potrebujemo tudi zelo veliko gradnikov, še posebej beljakovin in maščob, za izgradnjo novih celic. Zato je poleg proizvodnje ATP zelo pomembna tudi produkcija drugih visokoenergijskih molekul, kot je na primer NADPH (nikotinamid adenin dinukleotid fosfat), katerega vlogo še posebej lepo predstavi nedavno izdana knjiga (Lane, 2022).

Zaključek

Človeško telo je zapleten sistem z zelo učinkovito produkcijo celične energije. Moč našega telesa je presenetljivo večja od izsevalne moči Sonca, ko moč preračunamo na gram telesne mase. Pokazali smo, da je izsevani energijski tok na maso telesa pri dani temperaturi odvisen od razmerja S/m . To razmerje je pri človeku precej večje kot pri Soncu. V primeru homogenih krogelnih teles s povečevanjem radija r razmerje pada z $1/r$. S tem lahko razložimo tudi dejstvo, da manjše živali (na primer miš) v primerjavi z večjimi (slon) sevajo večji energijski tok, normiran na maso telesa, kar hkrati pomeni, da morajo manjše živali v primerjavi z večjimi zaužiti več kalorij na maso telesa.

Če upoštevamo še kompleksnost in moč našega telesa, normiramo na genom, močno presega tudi učinkovitost bakterij, ki so sicer zelo učinkovite pri produkciji energije, preračunane na gram telesne mase. Zato bi lahko rekli, kot je zapisal Nick Lane v svoji knjigi (Lane, 2022): »Življenje v prisposobi ni goreča sveča, je bolj podobno poletu rakete.«

Poleg velike energijske učinkovitosti človeškega telesa imamo tudi izredno dobro razvite regulacijske mehanizme. Samo za produkcijo ATP lahko izbiramo med glikolizo in celičnim dihanjem, pri čemer je glikoliza način pridobivanja ATP z veliko močjo in nizkim izkoristkom, celično dihanje pa proces z visokim izkoristkom in majhno močjo. Preklapljanje med režimoma je pomembno za delovanje mišic, imunskega sistema in drugih procesov v našem telesu.

Poleg ATP so pomembne še druge visokoenergijske molekule, kot je NADPH, ki ima zaradi svoje strukture in zelo skrbno regulirane koncentracije v celici ključen pomen pri sintezi bioloških molekul. Ker NADPH poznamo manj kot ATP, podajmo primer iz knjige Nicka Lana (Lane, 2022). Za izgradnjo (npr. pri delitvi) celice so potrebni gradniki. Palmitat je ključna maščobna molekula za izgradnjo celične membrane. Za izgradnjo ene molekule palmitata potrebujemo sedem molekul ATP in 14 molekul NADPH. Iz ene molekule glukoze lahko realno proizvedemo od 30 do 36 molekul ATP in zgolj dve molekuli NADPH. Količina

Človeško telo je zapleten sistem z zelo učinkovito produkcijo celične energije.

ATP iz ene molekule glukoze torej zadostuje za pet molekul palmitata, medtem ko potrebujemo sedem molekul glukoze, da bi proizvedli zadostno količino NADPH za tvorbo ene same molekule palmitata. Telo mora torej nenehno preusmerjati energijske presnovne poti in zagotavljati dovolj energije v obliki visokoenergijskih molekul, kot sta ATP in NADPH, v potrebnih količinah v določenem času. To je kompleksen proces, ki ga ni enostavno krmiliti in je občutljiv na okvare, ki se pojavljajo zaradi staranja, genetskih motenj in nezdravega načina življenja. Zavedati se je treba, da je pri bolezenskih spremembah celične presnove, ki se kažejo na primer pri sladkorni bolezni, raku ali Alzheimerjevi bolezni, celična presnova pogosto tako spremenjena, da jo je izredno težko povrniti v stanje normalnega fiziološkega delovanja.

To je kompleksen proces, ki ga ni enostavno krmiliti in je občutljiv na okvare, ki se pojavljajo zaradi staranja, genetskih motenj in nezdravega načina življenja.

Viri in literatura

- [1] Kladnik, R. (1989). *Visokošolska fizika. 3. del. Valovni pojavi. Akustika in optika*. Ljubljana: DZS.
- [2] Lane, N. (2015). *The vital question: energy, evolution, and the origins of complex life* (1st ed.). W. W. Norton & Company.
- [3] Lane, N. (2022). *Transformer: The Deep Chemistry of Life and Death*. Profile Books.
- [4] Lane, N. in Martin, W. (2010). The energetics of genome complexity. *Nature*, 467(7318), 929–934. <https://doi.org/10.1038/nature09486>
- [5] Rolfe, D. F. in Brown, G. C. (1997). Cellular energy utilization and molecular origin of standard metabolic rate in mammals. *Physiological Reviews*, 77(3), 731–758. <https://doi.org/10.1152/physrev.1997.77.3.731>
- [6] Vazquez, A. (2017). *Overflow Metabolism: From Yeast to Marathon Runners* (1st ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-02486-5>

REFERENČNI OKVIRI KOMPETENC

Digitalna bralnica ZRSS



Zavod
Republike
Slovenije
za šolstvo



Vse štiri publikacije lahko brezplačno preberate v digitalni bralnici ZRSS.

<https://www.zrss.si/digitalna-bralnica/referencni-okviri-kompetenc/>