

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET**  
**BIOLOŠKI ODSJEK**

OBOJENOST KOŽE LJUDI KAO PRILAGODBA NA UV ZRAČENJE  
HUMAN SKIN PIGMENTATION AS AN ADAPTATION TO UV  
RADIATION

SEMINARSKI RAD

Maja Sekelj

Preddiplomski studij molekularne biologije  
(Undergraduate Study of Molecular Biology)

Mentor: doc.dr.sc.Ana Galov

Zagreb, 2013.

## SADRŽAJ

1.	UVOD.....	2
2.	MIGRACIJE LJUDI I EVOLUCIJA BOJE KOŽE.....	4
3.	UV ZRAČENJE.....	5
4.	KOŽA I MELANIN.....	7
5.	FOLNA KISELINA.....	8
6.	VITAMIN D.....	9
7.	EVOLUCIJA PIGMENTACIJE I TAMNJENJE KOŽE.....	10
8.	LITERATURA.....	12
9.	SAŽETAK.....	13
10.	SUMMARY.....	14

## 1. UVOD

Naši preci imali su krzno kao zaštitni vanjski sloj i postojalo je više teorija o tome zašto su ga izgubili. Darwin je objašnjavao gubitak dlaka kao potrebu za glatkom kožom, dok ostale teorije govore o kožnim parazitima, spolnoj selekciji, životu u zatvorenim nastambama, boljem socijalnom ustroju i mogućnosti prilagodbe vanjskim temperaturama zbog korištenja odjeće i vatre. Danas se zna da se gubitak dlaka primarno dogodio kako bi se izgubila tjelesna toplina sa površine kože tijekom napora i zbog okolišnih prilika. Zbog gubitka dlaka, koža je bila više izložena djelovanju sunčevih zraka pa se morao razviti neki drugi mehanizam obrane od štetnog djelovanja UV zračenja (Jablonski i Chaplin,2010.).

Jedan od najboljih primjera evolucije prirodnom selekcijom je pigmentacija ljudske kože. Pigmentacija ljudske kože je rezultat prirodne selekcije koja se odvijala pod utjecajem dvaju čimbenika kako bi se prilagodila razina konstitutivne pigmentacije razini UV zračenja. Prvi čimbenik je doveo do evolucije tamne, fotoprotektivne pigmentacije u područjima visokog UV zračenja blizu ekvatora. Drugi je doveo do evolucije depigmentirane kože zbog potrebe održavanja proizvodnje vitamina D u koži ljudi u područjima s niskim UV zračenjem (Jablonski i Chaplin,2010.).

Tamna pigmentacija je evoluirala brzo nakon pojave roda *Homo* u Africi gdje je razina UVA i UVB zračenja cijele godine visoka. UVB zračenje stvara vitamin D u koži, ali i uništava folnu kiselinu. Održavanjem tamne pigmentacije, folna kiselina i njezin serumski oblik 5-metilhidrofolat, štite se od štetnog djelovanja UV zračenja koje izaziva fotolizu. Folna kiselina je potrebna za diobu stanica, popravak DNA, melanogenezu, a osobito je važna u vrijeme trudnoće kako ne bi došlo do oštećenja neuralne cijevi. UVB zračenje u tropskim područjima je dovoljno za proizvodnju vitamina D samo što tamnije pigmentirani ljudi moraju svoju kožu duže izlagati sunčevom svjetlu od osoba svjetlije kože. Selektivni pritisak u uvjetima visokog UV zračenja vodio je do evolucije tamne konstitutivne pigmentacije i mogućnosti da se poveća proizvodnja eumelanina (pigmenta koji štiti od UV zračenja) ovisno o sezonskom povećanju UVB zračenja. Održavanje metabolizma folne kiseline i dovoljna količina vitamina D su evolucijski faktori koji izravno utječu na reproduktivni uspjeh i preživljavanje rano u životu (Jablonski i Chaplin, 2010.)

Migracijama iz tropskih dijelova, ljudi tamnije pigmentacije došli su u okoliš gdje je UVB zračenje slabije. Reducirana količina UVB zračenja, a zbog toga i reducirana mogućnost sinteze vitamina D bili su glavni razlog prirodne selekcije ljudi svijetle kože.

Populacije koje imaju depigmentiranu kožu žive u područjima s najnižim godišnjim razinama UVB zračenja i najnižim ljetnim vrhuncem UVB zračenja.

Sezonsko tamnjenje kože (fakultativna pigmentacija) evoluiralo je kao mehanizam koji djelomično štiti od štetnog utjecaja UV zračenja. U rano proljeće kad se poveća razina UVB, koža postaje tamnija dok je smanjenjem zračenja u zimskom periodu i ten svijetliji. Depigmentirana koža i koža koja može tamniti evoluirala je mnogo puta u evoluciji hominina kroz različite nezavisne genetičke puteve pod pozitivnom selekcijom (Jablonski i Chaplin, 2010.).

## 2. MIGRACIJE LJUDI I EVOLUCIJA BOJE KOŽE

Boja kože, kao najuočljivija fizička osobina, koristila se od sredine 18.stoljeća za definiranje ljudskih skupina. Još od Hipokrata u 5.stoljeću, povezano se ljudske osobine, pa tako i boju kože, s okolišem, a povezanost tamne kože s intenzivnim sunčevim svjetlom i vrućinom razvijena je u „ klimatskoj teoriji“ Aristotela i njegovih sljedbenika (Jablonski i Chaplin,2010.)

Charles Darwin je u svojoj mladosti krenuo na put brodom Beagle i dok je plovio, vidio je golemu raznolikost biljaka, životinja i ljudi te je napisao knjigu „O porijeklu vrsta“, ali nije govorio o ljudima i njihovoj evoluciji. Tek kasnije piše o ljudima i boji kože, ali je odbacio ideju da je pigmentacija kože povezana s klimom. Prema Darwinu je spolna selekcija bila zaslužna za varijacije u pigmentaciji ljudske kože, ali danas se zna da spolna selekcija nije bila primarni niti najvažniji čimbenik za različite tipove ljudske kože iako u nekim kulturama muškarci preferiraju žene svjetlijeg tena (Jablonski i Chaplin, 2010).

Najraniji ljudi živjeli su u područjima visokog UV zračenja, u ekvatorijalnoj Africi, i kako su se razvijali došlo je do prenapučenosti, ali i razvoja kulture, pa su ljudi počeli migrirati u druge dijelove svijeta. Stoga je moralo doći do adaptacije na izlaganje novom okolišu. Postoje značajne varijacije u intenzitetu i količini UV zračenja između različitih područja na Zemlji pa u područjima s različitim klimom nastaju skupine ljudi koje su međusobno vrlo različite, a genetički su homogene u području koje je klimatski homogeno (Cavalli-Sforza, 2008).

Ljudi koji su migrirali u sjevernija područja gdje je razina UVB zračenja vrlo niska, izgubili su potencijal proizvodnje D vitamina gotovo čitave godine. Zbog toga se dogodila evolucija svijetlo pigmentirane kože ne samo jednom, već vjerojatno tri puta u ljudskoj povijesti.

Promatranja Samuela Stanhope Smith o povezanosti pigmentacije sa geografskom širinom i solarnim procesima pomogla su u razumijevanju ljudske pigmentacije te njezine veće povezanosti s geografskom širinom negoli s temperaturom, vlažnošću ili nadmorskom visinom. Dostupnost podataka o okolišu i uvođenje geografskih informacijskih sustava (GIS) dovelo je do točnijeg i preciznijeg ispitivanja veze između fizičkih parametara okoliša i pigmentacije te je uvjerljivo demonstriralo visoku korelaciju između pigmentacije i UV zračenja (Jablonski i Chaplin, 2010).

### 3. UV ZRAČENJE

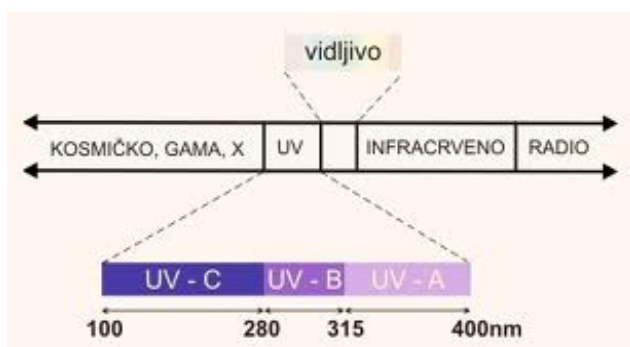
UV zračenje je od velike važnosti za Zemlju. Ima utjecaj na biljke, vodeni ekosustav i čovjekovo zdravlje. Dijeli se na UVA, UVB, i UVC (Slika 1.).

UVA je dugovalno zračenje valne duljine 400-315 nm i utječe na tamnjenje kože, izaziva različite fotokemijske reakcije, a može indirektno izazvati oštećenje DNA molekule i melanom. Prodire u dublje slojeve kože, sve do stanica derme te može izazvati trajna oštećenja kože i nastanak slobodnih radikala.

UVC je valne duljine manje od 280 nm i nema značajnije uloge jer ga apsorbira ozon pa ne dolazi do površine Zemlje, osim u slučajevima teških oštećenja ozonskog sloja.

UVB je srednjevalno zračenje valne duljine 315-280 nm i biološki je najučinkovitije. Važno je za stvaranje vitamina D, ali ima i negativnih učinaka na organizam. Kod prevelikog izlaganja, izaziva eritem i opekline, prerano starenje kože, a može izazvati i rak kože.

Na intenzitet i količinu ultraljubičastog zračenja utječu mnogi čimbenici. Dolazi do apsorpcije, raspršenja i transmisije zračenja. Osim apsorpcije ozona, važna je vrsta i količina naoblake, nadmorska visina (veća visina = veće zračenje), refleksija na tlu, ali isto tako godišnje doba, doba dana, geografska širina i solarni zenitni kut (kut pod kojim solarna radijacija prolazi kroz atmosferu).

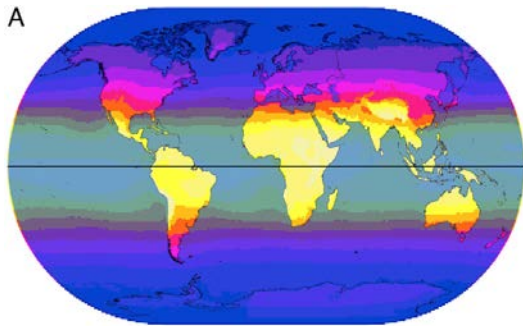


**Slika 1.** Elektromagnetski spektar i podjela UV zračenja.

(<http://www.fhmzbih.gov.ba/latinica/UV/uv%20index.html>)

Na Zemljinu površinu dolazi puno više UVA zračenja nego UVB zračenja. UVB zračenje je raspršeno i apsorbirano kisikom i ozonom te molekulama vode u atmosferi. Intenzitet i distribucija UVB zračenja više varira od UVA upravo zbog tih čimbenika. UVB zračenje je

najintenzivnije u tropskom području u sušnim dijelovima i u područjima gdje je veća nadmorska visina kao što su Tibetanske visoravni i Altiplano (visoravan u Andama) (Jablonski i Chaplin, 2010). Sjeverno i južno od 46-og stupnja geografske širine, razina UVB nije dovoljna za proizvodnju vitamina D gotovo cijele godine (Slika 2.)

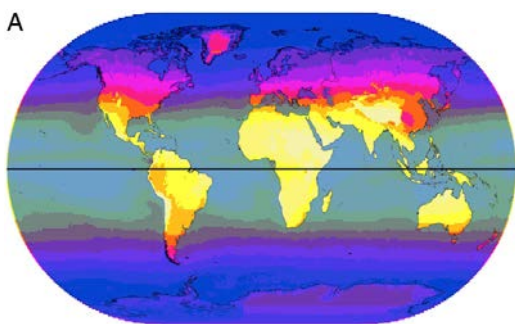


**Slika 2.** Prosječni godišnji intenzitet UVB zračenja prikazan gradacijom od svjetlijeg prema tamnijem.

(<http://whyevolutionistrue.wordpress.com/2010/07/20/why-does-skin-color-vary-among-human-populations/world-uv/>)

U Africi je razina UVB zračenja visoka, dok sjeverna Euroazija prima zanemarive količine.

Slično tome, UVA zračenje je na ekvatoru i tropskim područjima ekstremno visoko (Slika 3.), ali više varira tokom godine, dok je izvan tropa niže i nema toliko varijacija.

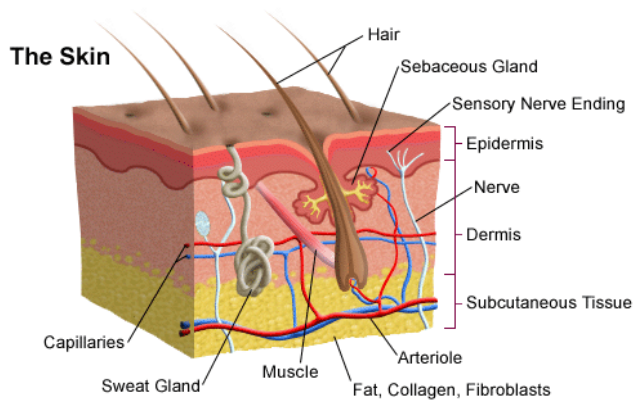


**Slika 3.** Godišnji intenzitet UVA zračenja prikazan gradacijom od svjetlijeg prema tamnijem.

(<http://www.pnas.org/content/107/suppl.2/8962/F2.expansion.html>)

## 4. KOŽA I MELANIN

Koža je najveći ljudski organ. Sastoji se od više slojeva od kojih svaki ima određenu funkciju (Slika 4.). Vanjski sloj je epidermis i u njemu se nalaze melanociti u kojima se proizvodi pigment melanin. Količina i tip melanina koji varira između crnog, smeđeg, žutog i crvenog pigmenta odgovorni su za različitu pigmentaciju kože. Tamno pigmentirani ljudi i ljudi sa svjetlijom bojom kože imaju isti broj melanocita, a razlike u boji kože zapravo ovise o količini melanina koju svaki melanocit proizvede. Zahvaljujući stimulirajućem djelovanju UV zračenja, melanin se proizvodi iz aminokiseline tirozina, a najvažniji enzim u tom biokemijskom putu sinteze je enzim tirozinaza. Bez obzira na boju kože, većina ljudi ima dovoljno tirozinaze zbog koje bi se proizvelo dovoljno melanina za vrlo crnu kožu kad bi taj enzim bio u potpunosti aktivan. No, kod ljudi svjetlije kože postoje dva genetska čimbenika koji utječu na djelovanje tirozinaze. To su inaktivna forma tirozinaze i sinteza različitih inhibitora kako bi se spriječila puna aktivnost tog enzima. Kao rezultat toga proizvodi se manje melanina (Lauralee Sherwood, 2010) Ispod epidermisa je dermis ili corium u kojem se nalaze receptori za osjet dodira i boli te krvne žile i kožne žlijezde. Duboki sloj ili potkožje, subcutis je građen od vezivnog tkiva u koje se taloži mast te spaja kožu s njenom podlogom.



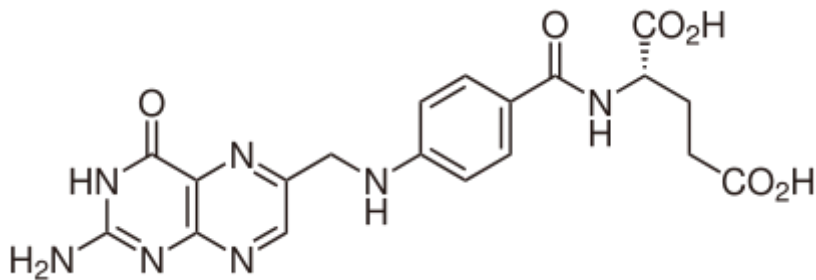
**Slika 4.** Građa kože

([http://medicalcenter.osu.edu/greystone/images/ei\\_0390.gif](http://medicalcenter.osu.edu/greystone/images/ei_0390.gif))



## 5. FOLNA KISELINA

Folna kiselina ili vitamin B9 (Slika 5.) vrlo je važna za biološke funkcije u organizmu.



**Slika 5.** Folna kiselina

([http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cf/Folic\\_acid.svg/420px-Folic\\_acid.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cf/Folic_acid.svg/420px-Folic_acid.svg.png))

Strukturu joj čine supstituirani pteridinski prsten, p-aminobenzojeva kiselina i jedna ili više jedinica L-glutaminske kiseline. Osnovna funkcija folne kiseline u metabolizmu je prijenos funkcionalnih grupa sa jednim C-atomom (važna je u biokemijskim reakcijama koje obuhvaćaju prijenos C1-jedinica različitih oksidacijskih stanja – formilne, formijatne, metilne i hidroksimetilne skupine). Aktivni oblici folne kiseline su tetrahidrofolat i drugi derivati, a nastaju pretvorbom folne kiseline u dihidrofolnu u jetri. Folna kiselina je važna za sintezu purina i pirimidina, metabolizam aminokiseline, u sintezi, popravku i metilaciji DNA, za normalnu embriogenezu te za normalan rast i razvoj stanica koje se brzo dijele (za normalnu reprodukciju). Regulira i proizvodnju melanina jer je potrebna za sintezu GTP-a koji je neophodan za stvaranje tetrahidrobiopterina (BH<sub>4</sub>) i 6 tetrahidrobiopterina (6BH<sub>4</sub>) u melanocitima i keratinocitima koji pak regulira aktivnost tirozinaze u melanosomima (Jablonski i Chaplin, 2010). U evoluciji tamne pigmentacije odlučujući faktor bila je zaštita od fotolize folata kako bi se spriječila smanjena plodnost. Folna kiselina je odgovorna za pravilan razvoj stanica koje se brzo dijele pa nedostatak folne kiseline zbog fotolize UV zračenjem može uzrokovati teška oštećenja neuralne cijevi i nastanak različitih defekata. Nedostatak folata uzrokuje pogrešnu replikaciju DNA zbog umetanja uracila pa se kida lanac.

Različitim eksperimentima pokazano je da je veza između pigmentacije kože i metabolizma folata komplicirana i uključuje neposrednu degradaciju folata, ali i degradaciju u prisutnosti flavina i porfirina reaktivnim kisikovim spojevima (ROS).

## 6. VITAMIN D

Evolucija svijetlog pigmenta povezuje se sa proizvodnjom vitamina D u područjima gdje je sunčevo zračenje slabije. Vitamin D3 nastaje kada UVB zračenje prodre u kožu i biva apsorbirano 7-dehidrokolesterolom kako bi nastao previtamin D3 (kolekalciferol). Sinteza vitamina D3 ovisi o solarnom zenitnom kutu (visini Sunca), odn. intenzitetu UV zračenja koje se mijenja geografskom širinom, dobom godine i dobom dana, a debljina kože i količina pigmenta u koži također utječu na proizvodnju vitamina D (Jablonski i Chaplin, 2010) Više faktora uključeno je u sintezu vitamina D u našim tijelima:

1. dio dana – više vitamina D će se stvoriti ako se sunčamo sredinom dana jer je tada UV zračenje najjače
2. područje u kojem živimo – ako živimo bliže ekvatoru gdje je UV zračenje jače lakše ćemo proizvoditi vitamin D
3. boja kože – tamnijoj koži treba duže vremena da bi se proizvela dovoljna količina D vitamina nego što je to potrebno svijetlijoj koži
4. koliko kože se izlaže Suncu – ako je više kože otkriveno sunčevim zrakama, lakša i brža će biti proizvodnja vitamina D

Manjak vitamina D u središnjoj Europi i Sjevernoj Americi je učestala pojava zimi. Kako se udaljavamo od ekvatora, manje UV zračenja stiže do Zemljine površine pa je stoga i sinteza vitamina D ograničena. Tamnijim ljudima treba duža izloženost Suncu kako bi se osigurala dovoljna količina vitamina D jer imaju više melanina u svojim stanicama.

Važnost vitamina D3 kao čimbenika selektivnog pritiska u evoluciji pigmentacije, povezuje se s njegovom važnošću za opće dobro cijelog organizma. Njegova uloga u intestinalnoj apsorpciji kalcija te u formaciji i razvoju kosti poznata je već desetljećima. U novije vrijeme istraživanja su pokazala da vitamin D3 djeluje pozitivno na imunski sustav i ima značajnu ulogu u normalnoj funkciji gušterače, mozga i srca. Pomaže u sprečavanju multiple skleroze, a i kognitivne sposobnosti su povezane s razinom vitamina D. Prirodna selekcija je bila jaka u održavanju proizvodnje vitamina D u uvjetima gdje je UV zračenje reducirano (Jablonski i Chaplin, 2010)

## 7. EVOLUCIJA PIGMENTACIJE I TAMNJENJE KOŽE

U ekvatorijalnoj Africi, pripadnici roda *Homo*, a kasnije i *Homo sapiens*, bili su izloženi visokom intenzitetu UVA i UVB zračenja što je dovelo do evolucije tamne pigmentacije i sposobnosti da se poveća proizvodnja melanina ovisno o sezonskim UVB varijacijama. Kako su se ljudi raširili iz tropa došli su u područja s godišnjim nižim intenzitetom UV zračenja. Reducirana količina UVB zračenja i ograničena proizvodnja D vitamina uzrokuju pozitivnu selekciju depigmentacije.

Između 23. i 46. stupnja geografske širine evolucijom su nastali djelomično depigmentirani ljudi koji imaju sposobnost tamnjenja. Fakultativna pigmentacija evoluirala je mnogo puta u ljudskoj povijesti, vjerojatno kao rezultat neovisnih mutacija na genima koji kontroliraju pigmentacijski sustav i zbog protoka gena. Tamnjenje obuhvaća dva mehanizma – izravno tamnjenje (IPD – immediate pigment darkening) i zakašnjelu reakciju tamnjenja (DTR – delayed tanning reaction). IPD mehanizmi još nisu dovoljno objašnjeni, ali se čini da dolazi do premještanja melanosoma u keratinocitima i melanocitima zajedno s fotooksidacijom prisutnog eumelanina. IPD je razvijen kod ljudi tamne konstitutivne pigmentacije, a izaziva ga izlaganje UVA svjetlu. (Jablonski i Chaplin,2010.)

DTR ili normalno tamnjenje je proces zbog kojeg se razvija fakultativna pigmentacija. Zakašnjelo tamnjenje je rezultat i UVA i UVB zračenja. Ovisno o kojoj vrsti UV zračenja se radi, ten se razvija postepeno u različitim vremenskim razdobljima i zadržava se određeno vrijeme. Tamnjenje omogućuje bolju zaštitu od UV zračenja, a izgleda da ga potiču signali iz oštećene DNA molekule. Iz evolucijske perspektive važnost DTR-a je upravo u tome što se radi o zakašnjelom tamnjenju i osnovni ten se razvija sporo, što omogućava sintezu D vitamina. No, u rano proljeće se povećava razina UVB zračenja. Kako Sunce biva sve jače, koža je tamnija što daje prikladnu zaštitu protiv uništavanja folne kiseline.

Suvremeni liječnici vide tamnjenje kao nesavršenu adaptaciju na UV zračenje koje oštećuje kožno tkivo, imunološki sustav i DNA te vodi do promjena koje izazivaju rak kože. To može vrijediti za današnjeg dugoživućeg čovjeka koji često putuje u područja drugačije klime na svoj odmor, međutim to ne može vrijediti za ljude koji su živjeli do 19. stoljeća koji nisu putovali daleko od doma da bi išli na odmor negdje gdje je sunčano. Kod tih ljudi rak kože nije mogao imati učinak na reproduktivni uspjeh. Stoga u kontekstu evolucije čovjeka, evolucija tamnjenja je bila sjajan evolucijski kompromis upravo zbog održavanja svijetlijeg

tena a time i sinteze vitamina D kad je UV zračenje slabije, a s druge strane tamnijeg tena kad je UV jače, što štiti od uništavanja folne kiseline fotolizom.

## 8. LITERATURA

Berg JM, J Tymoczko, L Stryer (2002) Biochemistry, fifth edition

Cavalli – Sforza, LL(2008) Geni, narodi i jezici (Algoritam, prvo izdanje)

Chaplin G, Jablonski NG (2009) Vitamin D and the evolution of human depigmentation. Am J Phys Anthropol 139:451-461

Chaplin G, Jablonski NG (1998) Hemospheric difference in human skin color. Am J Phys Anthropol 107:221-223

Hiernaux J (1975) Jednakost ili nejednakost rasa (Školska knjiga, Zagreb)

Jablonski, NG, Chaplin G. (2010) Human skin pigmentation as an adaptation to UV radiation

Jablonski N, George Chaplin (2000) The evolution of human skin coloration

Janković I, Karavanić I (2009) Osvit čovječanstva, Počeci našega biološkog i kulturnog razvoja (Školska knjiga, Zagreb)

Lewis B (2004) Genes VIII

Sherwood L (2010) Human Physiology- From Cells to Systems, seventh edition

[www.en.wikipedia.org](http://www.en.wikipedia.org)

[www.fhmzbih.gov.ba](http://www.fhmzbih.gov.ba)

[www.medicalcenter.osu.edu](http://www.medicalcenter.osu.edu)

[www.pnas.org](http://www.pnas.org)

[www.vitamindsociety.org](http://www.vitamindsociety.org)

[www.vitamini.hr](http://www.vitamini.hr)

## 9. SAŽETAK

Pigmentacija ljudske kože nastala je kao rezultat prirodne selekcije koja se odvijala pod utjecajem dvaju čimbenika. U područjima visokog UV zračenja, blizu ekvatora, razvila se tamna pigmentacija kako bi se zaštitila folna kiselina, dok je do evolucije depigmentirane kože došlo u područjima s niskim UV zračenjem zbog potrebe održavanja proizvodnje vitamina D. Važnost očuvanja folne kiseline i sama proizvodnja vitamina D kako bi ljudsko tijelo normalno funkcioniralo je ogromna. Folna kiselina i vitamin D važni su za reproduktivni uspjeh. Između ekvatora i polova, između 23. i 46. stupnja geografske širine evoluirali su ljudi s konstitutivnom pigmentacijom koji mogu tamniti. Tamnjenje kože ili fakultativna pigmentacija je odličan evolucijski kompromis jer kada je intenzitet UVB zračenja niski, koža ostaje svijetlija da bi se mogao proizvoditi vitamin D u takvim uvjetima, a kako se poveća intenzitet UVB zračenja, ten postaje tamniji da bi se zaštitila folna kiselina od fotolize uzrokovane UV zračenjem. Pigmentacija ljudske kože predstavlja jedan od najboljih primjera evolucije prirodnom selekcijom te je savršen model za njeno učenje i razumijevanje.

## 10. SUMMARY

Pigmentation of human skin is the result of natural selection, which took place under the influence of two factors. In areas of high UV radiation, near the equator, dark pigmentation has developed to protect folate, while the evolution of depigmented skin occurred in areas with low UV radiation because of the need to maintain the production of vitamin D. The importance of preservation of folic acid and vitamin D production itself in the human body is huge. Between the equator and the poles, between 23 and 46 degrees of latitude, there evolved humans with constitutive pigmentation of tannable skin. Tanning or facultative pigmentation is a great evolutionary compromise because when the intensity of UVB radiation is low, the skin remains of lighter pigmentation so it could produce vitamin D under such conditions, and as intensity of UVB radiation is getting higher, tan is getting darker so it could protect folate acid from photolysis caused by UV radiation. Pigmentation of human skin is one of the best examples of evolution by natural selection and it is the perfect model for learning and understanding it.