



ZEMLJINA ATMOSFERA I SAVREMENA ENERGETIKA

DOI: 10.58584/2490-3752.2022.8.8.105

UDK: 551.511:502.21

A kad im se kaže: 'Ne širite nered na Zemlji', oni odgovaraju: 'Pa mi samo popravljamo!' O, ne, oni su ti koji šire nered - ali to oni ne primjećuju! (Kur'an)

SAŽETAK

Cilj ovog rada je analiza utjecaja savremene energetike na Zemljinu atmosferu i narušavanje energetske ravnoteže sistema Zemlja-atmosfera. Zagađenje životne sredine ekspanzijom industrijske energetike i povećanjem koncentracije stakleničkih gasova, direktno utiče na klimu Zemlje, što ima za posljedicu narušavanje Zemljine biosfere. U radu je analizirana promjena temperature površine Zemlje u posljednjih 160 godina, u periodu od 1860. do 2020. godine. Utvrđeno je da je za taj period globalni porast temperature iznosio oko $0,9^{\circ}\text{C}$. Savremena naučna istraživanja pokazuju da već nakon povećanja prosječne temperature površine Zemlje za oko $\Delta T \approx 1,5$ stepeni ($^{\circ}\text{C}$ ili K), mogu započeti ireverzibilni procesi u biosferi, što rezultira narušavanjem toplotne ravnoteže sistema Zemlja-atmosfera. Ovo je posebno bitno s aspekta prognoze vremena i klime jer narušavanje toplotne ravnoteže Zemlje i donjih slojeva atmosfere, rezultira vremenskim i klimatskim promjenama na Zemlji. Stabilnost gornjih slojeva atmosfere je od ključnog značaja za nesmetano funkcionisanje navigacionih i komunikacionih sistema, gasovoda, transformatorskih stanica, visokonaponskih dalekovoda itd. Primjenom Stefan-Boltzmannovog zakona zračenja crnog tijela, dokazano je da prisustvo atmosfere dovodi do zagrijavanja Zemljine površine kroz efekat staklene bašte. U tom kontekstu posebno je značajno

infracrveno zračenje koje se emituje s površine Zemlje, a čija snaga trenutno iznosi $P = 2,2 \cdot 10^{14}$ kW. Uz odgovarajući matematički formalizam, primjenom Stefan-Boltzamniovog zakona, urađena je procjena koliki su maksimalni kapaciteti vještačkih izvora toplotne energije koji se mogu instalirati na površini Zemlje, bez narušavanja toplotne ravnoteže sistema Zemlja-atmosfera. Snaga tih dodatnih izvora energije iznosi $\Delta P \approx 3,6 \cdot 10^{12}$ kW. Trenutna snaga energije proizvedene na Zemlji dostigla je vrijednost $0,5 \cdot 10^{10}$ kW. Značajan doprinos narušavanju toplotne ravnoteže sistema Zemlja-atmosfera daju i primjese (nečistoće) koje kontaminiraju atmosferu, a javljaju se kao posljedica vađenja i korištenja fosilnih goriva, kao i krčenja i spaljivanja šuma. Primjenom kvantne fizike i adekvatnog matematičkog formalizma uspostavljena je veza između koncentracije molekula primjese na površini Zemlje i promjene površinske temperature Zemlje koju izaziva ta primjesa svojim prisustvom.

Ključne riječi: *Zemlja, atmosfera, biosfera, energetika, ekologija, toplotna ravnoteža, energija, temperatura, infracrveno zračenje, primjesa*

Uvod

Problem zagađenja životne sredine je najvažniji ekološki problem našeg vremena, kako u pogledu direktnog zagađenja prirode, tako i zbog uticaja sve veće koncentracije stakleničkih gasova u atmosferi na klimu Zemlje.

Godine 2021. Nobelovu nagradu za fiziku (tačnije polovinu nagrade) dobili su klimatolozi Klaus Hasselmann i Syukuro Manabe za modeliranje fizike Zemljine klime, matematički opis nestabilnih sistema i precizno predviđanje globalnog zagrijavanja. Manabe je bio jedan od prvih istraživača koji je ukazao na utjecaj sve veće koncentracije ugljen-dioksida u atmosferi na klimu Zemlje. Šezdesetih godina prošlog stoljeća vodio je razvoj prvih kompjuterskih modela fizičke klime. Otprilike deset godina nakon prvih rezultata Manabea, Klaus Hasselmann je stvorio vlastiti model koji je povezao haotično i teško predvidljivo lokalno vrijeme i globalnu klimu, a također je predložio metodologiju koja je omogućila da se dokaže ključna uloga čovjeka u brzim klimatskim promjenama koje se trenutno dešavaju.¹

1 K. Hasselmann (1976) *Stochastic climate models* Part I. Theory, Tellus, 28:6, 473-485, DOI: 10.3402/tellusa.v28i6.11316 (preuzeto: 20.8.2022)

Glavni zaključak istraživanja naučnika je sljedeći: danas odlučujući doprinos pogoršanju ovog problema daje savremena industrijska energetika. Osim energetike, značajan negativan uticaj na životnu sredinu imaju savremena građevinska industrija, industrijski objekti različite namjene, saobraćaj, poljoprivreda i druge oblasti ljudske djelatnosti.²

Globalno zagrijavanje: mit ili stvarnost?

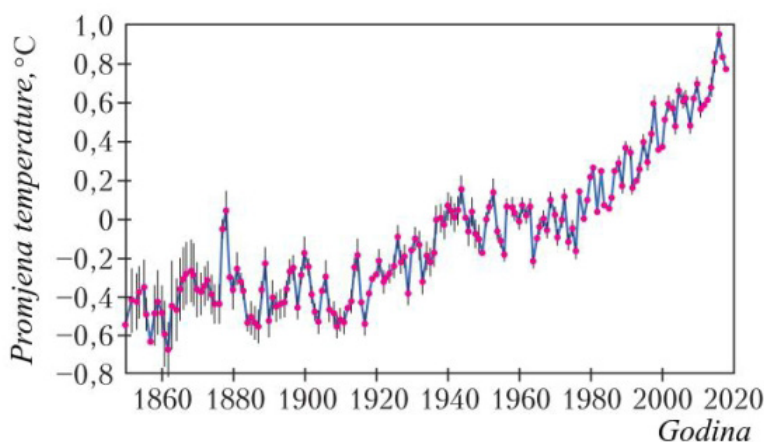
Sa stanovišta uslova ljudskog života i evolucije biosfere u cjelini, Zemljina atmosfera je od posebnog interesa u dva aspekta.

Prvo, skup procesa prijenosa mase, energije i toplote koji se odvijaju u atmosferi, kao i interakcija atmosfere s okeanima, kopnom i ledenim kapama na Zemljinim polovima, određuju vrijeme (npr. na srednjim geografskim širinama Zemlje, svaka promjena vremena uzrokovana je uglavnom atmosferskim pojavama, dok je vrijeme u tropima određeno interakcijom atmosfere i okeana) i klimu - kao stabilnu karakteristiku vremenskih prilika pojedinih kontinenata, klimatskih zona, planinskih lanaca i drugih geografskih objekata kroz dugi niz decenija. Drugo, hemijski sastav atmosfere je od vitalnog značaja za ljude, kao i za životinjski i biljni svijet uopće.

Era naučnog, tehničkog i tehnološkog napretka sredinom 19. stoljeća obilježena je početkom klimatskih promjena povezanih s porastom globalne temperature na Zemlji, tj. temperature Zemljine površine usrednjene na geografske koordinate, doba dana i godišnje doba. Globalna temperatura karakteriše termoeenergetsko stanje sistema Zemlja-atmosfera u cjelini, tako da njena promjena tokom godina određuje evolucijski put termičkog stanja same planete.

Slika 1 ilustruje kako se globalna temperatura Zemlje mijenjala u posljednjih 160 godina. Počevši od 1860. godine - vrijeme prvih instrumentalnih mjerenja površinske temperature vazduha - do sadašnjeg vremena, došlo je do postepenog povećanja temperature na Zemlji. Za period od 1860. do 2020. godine globalni porast temperature iznosio je oko $\Delta t = 0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2 <https://physicsworld.com> (pristup: 20.8.2022)



Slika 1 - Grafik promjene globalne temperature Zemlje. Srednja promjena temperature za period 1951-1980. iznosila je nula.³

Pri tome porast temperature je bio neujednačen tokom godina. Prilično stabilan spor porast zabilježen je tokom perioda 1860-1940., kada je temperatura vazduha porasla za 0,4 °C. Zatim, tokom perioda 1940-1980., nastupila je faza umjerenih kolebanja srednjih godišnjih temperatura bez ikakvog primjetnog trenda. Potom je uslijedio period od 1980. do danas naglog porasta globalne temperature, čije je povećanje iznosilo još 0,5 °C. U 1980-im - sredinom 1990-ih zabilježen je niz izuzetno toplih godišnjih doba, a 1998. se pokazala izuzetno toplom za cijeli period mjerenja temperature na Zemlji.

Danas ostaje otvoreno pitanje da li su negativne klimatske promjene i uočeno globalno zagrijavanje posljedica ljudskog djelovanja, ili su uzrokovani silama prirode izvan naše kontrole, ili su kombinacija različitih faktora. Uprkos postojanju različitih gledišta o uzrocima ovog fenomena, sama činjenica globalnog zatopljenja na Zemlji je neosporna (prema UNESCO-u, samo u posljednjih deset godina

³ Grafik je napravljen na osnovu podataka uzetih sa veb-sajta Svjetske meteorološke organizacije <https://public.wmo.int/ru>. (pristup: 21.8.2022)

prosječna temperatura na planeti Zemlji se povećala za $0,3^{\circ}\text{C}$).⁴ Promjena temperature vazduha uzrokuje razvoj niza dinamičkih procesa u geosferskom i hidrosferskom omotaču Zemlje, koji mogu imati i pozitivan i negativan uticaj na prirodnu sredinu oko nas. Ovo posljednje je povezano sa značajnim smanjenjem sigurnosti i povećanjem štete od prirodnih katastrofa. Dakle, prema proračunima američkih stručnjaka, zagrijavanje atmosfere za 1°C može dovesti do povećanja protoka vazduha na atlantskoj obali Sjedinjenih Američkih Država za 40-60%, što će nesumnjivo pogoršati ionako prilično visoku ranjivost ove teritorije od tropskih tajfuna i uragana.⁵

Svake godine toplotno zagađenje postaje sve važnije za ekologiju planete. Ako do sredine prošlog stoljeća ljudska industrijska aktivnost nije izazivala veliku zabrinutost, onda nas posljednjih decenija drugi talas intenziviranja globalnog zagrijavanja tjera da na toplotno zagađenje gledamo na drugačiji način, stavljajući ga na jedno od prvih mjesta među negativnim posljedicama ljudske ekonomske aktivnosti. Industrijski objekti, uključujući pogone za proizvodnju energije, mogu biti odgovorni za pojavu globalnih, regionalnih i lokalnih ekoloških problema. Međutim, glavni globalni negativni uticaj industrijske energetike na životnu sredinu je emisija stakleničkih gasova u atmosferu.

Razmjere moderne industrijske energije još uvijek su male u okviru prirodne energetske ravnoteže: potreba čovječanstva za energijom iznosi samo oko dva desetihiljadita dijela ukupne energije emitovane Sunčevim zračenjem, čija snaga iznosi približno $1,7 \cdot 10^{14}$ kW. Istovremeno, svjetska industrijska energija srazmjerna je energiji koja se koristi za procese fotosinteze ogranske materije i, prema procjenama, dostiže oko 30% te energije.⁶ To ukazuje na značajnu mogućnost primjetnog uticaja elektroenergetike na fizičko-hemijska i optička svojstva atmosfere. I ovaj uticaj se može manifestovati na različite načine. S jedne strane, promjena optičkih

4 <https://www.unesco.org/en/ideas-data/data-center> (pristup: 21.8.2022)

5 F. Freith, R.E. West (1997) *Energy Efficiency*, CRC Press, New York.

6 WMO (2018) State of the Global Climate in 2018, WMO Statement on the State of the Global Climate. (preuzeto: 21.8.2022)

svojstava atmosfere može promijeniti razmjenu energije zračenja između atmosfere i Zemljine površine, s druge strane, promjena fizičkih i hemijskih svojstava atmosfere uzrokovana ljudskom aktivnošću može uticati na stanje biosfere, mijenjajući uslove života svih živih bića nagore.

Postavlja se prirodno pitanje: koji su maksimalni proizvodni tehnički i tehnološki kapaciteti koji se mogu koristiti na površini Zemlje bez narušavanja toplotne i ekološke ravnoteže biosfere?

Atmosfera i toplotna ravnoteža sistema Zemlja-atmosfera

Zemljina atmosfera je uslovno podijeljena na dva dijela: gornji i donji. Gornji i donji sloj atmosfere interaguju kroz različite elektrofizičke, gasnodinamičke i hemijske procese, formirajući složen sistem podložen uticaju i solarnih i zemaljskih globalnih energetskih procesa.

Donji dio atmosfere sastoji se od dva sloja s uslovnim granicama. Kada krenemo s površine Zemlje naviše, prvo ulazimo u troposferu, gdje živimo i gdje pada kiša, snijeg, plutaju oblaci, tu su oluje i grmljavine, tj. sve što je uključeno u pojam vremena i klime. Troposfera se prostire na visini od 12 do 15 km. Iznad troposfere nalazi se stratosfera koja ima gornju granicu na visini od 45 do 50 km, a temperatura stratosfere opada s povećanjem visine. U stratosferi se nalazi ozonski omotač koji sadrži maksimalnu koncentraciju jona i molekula ozona O_3 (na visini od 20 do 50 km), koji štiti sav život na Zemlji od štetnih ultraljubičastih zraka. Između troposfere i stratosfere postoji tanak prijelazni sloj koji se naziva tropopauza. To je sloj gdje se vazduh prestane hladiti s visinom i postaje gotovo u potpunosti suh.

Sastav niže atmosfere nije uvijek bio isti kao što ga sada vidimo. U početnoj fazi razvoja Zemlje i evolucijskih procesa u biosferi, atmosfera nije sadržavala slobodni kiseonik: on je ulazio u sastav ugljen-dioksida. Analiza Zemljinih stijena pokazuje da su živi organizmi stvorili savremeni sastav atmosfere: slobodni kiseonik se počeo pojavljivati u atmosferi prije oko 1,8 milijardi godina (starost

Zemlje je oko 4,6 milijardi godina), kao rezultat djelovanja mikroorganizama (bakterija), pretvarajući ugljen-dioksid u kiseonik, čije je prisustvo dovelo do stvaranja ozonskog omotača. Stvoreni su uslovi za nastanak različitih živih organizama čija je životna aktivnost povezana s pretvaranjem atmosferskog ugljen-dioksida u ugljenik organskih materija i kiseonik pod uticajem Sunčeve energije. Donja atmosfera sastoji se uglavnom od azota ($\approx 78,08\%$), kiseonika ($\approx 20,9\%$), argona ($\approx 0,9\%$) i mješavine u malim količinama ugljen-dioksida, neona, helijuma, metana i kriptona, koji su optički transparentni za infracrveno zračenje.⁷

Gornji sloj atmosfere je vanjski dio Zemljinog gasovitog omotača koji se proteže od visina reda 50-60 km do udaljenosti nekoliko desetina Zemljinih poluprečnika ($R_z = 6370$ km). Gornji sloj atmosfere je konvencionalno podijeljen na više slojeva koji se međusobno preklapaju: mezosfera (50 km $<R<$ 150 km), termosfera (150 km $<R<$ 1000 km), egzosfera (1000 km $<R<$ 1500 km), jonosfera (1200 km $<R<$ 1800 km), plazmosfera (1600 km $<R<$ $4R_z$), magnetosfera ($4R_z <R<$ $30R_z$), pri čemu su prve tri sfere povezane s neutralnim česticama, a sljedeće tri s naelektrisanim, odnosno jonima i elektronima nastalim kao rezultat jonizacije atoma i molekula Sunčevim zračenjem ili česticama visokih energija.

Poznavanje stanja gornjeg sloja atmosfere i sposobnost predviđanja njegovih promjena neophodni su čovječanstvu u istoj mjeri kao i prognoza vremena i klime, određeni stanjem donje atmosfere. Od ispunjenja odgovarajućih uslova u gornjem sloju atmosfere zavisi mnogo toga u nekim ključnim oblastima života savremene civilizacije, kao što je rad svih vrsta radiokomunikacionih sistema, pouzdanost dalekovoda, čak i zdravlje ljudi. Svemirsko vrijeme treba predvidjeti ne samo da bi se upozorilo na prijetnju satelitima ili astronautima. Naprimjer, intenzivni tokovi naelektrisanih čestica u jonosferi indukuju jake električne struje na površini Zemlje, što može izazvati vanredne situacije kod gasovoda, navigacionih i komunikacionih sistema, transformatorskih stanica, visokonaponskih dalekovoda itd.

7 A. W. Brinkman (2008) *Physics of the Environment*, Durham University, UK.

Da bi se ocijenio uticaj ljudskih aktivnosti na životnu sredinu, potrebno je saznati koji se energetske procesi odvijaju u atmosferi i na površini Zemlje i koliki udio u tim procesima ima ili može imati čovjek. U ovom slučaju ćemo uzeti u obzir neke empirijske činjenice svemirskog posmatranja uticaja elektromagnetne energije Sunčevog zračenja na sistem Zemlja-atmosfera.

Poznato je da se tokom prolaska Sunčevog zračenja kroz Zemljinu atmosferu istovremeno dešavaju tri procesa konverzije energije:

1. refleksija oko 34% Sunčevog zračenja nazad u svemir (od oblaka i same atmosfere);
2. apsorpcija oko 19% Sunčevog zračenja atmosferom, kada se energija transformiše u atmosferi i zrači nazad u svemir u obliku termičkog (infracrvenog) zračenja;
3. prenošenje oko 47% Sunčevog zračenja do površine Zemlje i refleksija oko 20% tog zračenja nazad u svemir u obliku infracrvenog zračenja.

Kao rezultat toga, samo 27% Sunčevog zračenja koje pada na Zemlju iz svemira u cjelini se transformiše u energiju koja odlazi na zagrijavanje i isparavanje vode, zagrijavanje atmosfere, stvaranje vjetrova, talasa, vodenih struja itd.⁸

Ako pretpostavimo da se pretvaranje toplotne energije u rad odvija u reverzibilnim procesima, tada je koeficijent efikasnosti (koeficijent korisnog dejstva) prirodnog toplotnog motora Sunce-atmosfera-Zemlja, čije je radno tijelo Zemljina atmosfera, određena dobro poznatom formulom

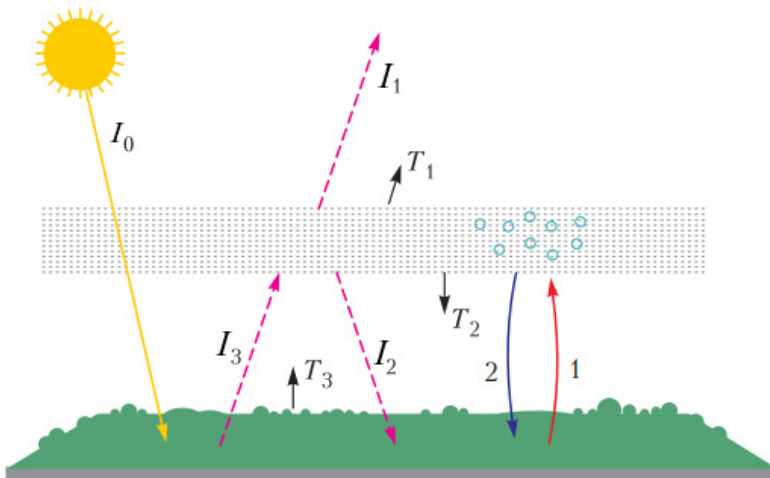
$$\eta = \frac{T_s - T_z}{T_s}.$$

Ovdje je $T = t + 273,15$ temperatura na Kelvinovoj skali, $t_s = 5500$ °C je prosječna temperatura površine Sunca, a $t_z = 15$ °C je prosječna temperatura Zemljine površine. Ako se postojeća energetska

8 UNEP (1995) United Nation Environment Programme, Global Biodiversity Assessment, Cambridge University Press. Cambridge.

ravnoteža u sistemu Zemlja-atmosfera u cjelini ne promijeni tokom dolaska i odlaska transformisanog Sunčevog zračenja, onda se ne mijenja ni klima na Zemlji. Klimatske promjene i nastaju kao rezultat poremećaja energetske ravnoteže.

Slika 2 prikazuje ulogu koju igra atmosfera kao izvor infracrvenog zračenja u toplotnoj ravnoteži sistema Zemlja-atmosfera. Pretpostavimo da se emisija i apsorpcija u infracrvenom dijelu spektra dešavaju u nižoj atmosferi visine nekoliko desetina kilometara, gdje je koncentrisana gotovo sva njena masa.



Slika 2 - Šematski prikaz toplotne ravnoteže sistema Zemlja-atmosfera

Niži i najgušći sloj (troposfera), koji se proteže do visina oko 8-10 km u područjima visokih geografskih širina i 16-18 km u ekvatorijalnom pojasu, sadrži oko 80% mase cijele atmosfere i karakteriše ga gotovo linearna distribucija (smanjenje) temperature s visinom. Pretpostavimo da su toplotni tokovi ravnomjerno raspoređeni po površini Zemlje, tj. svi glavni energetske procesi su usrednjeni, i da u infracrvenom dijelu spektra Zemlja i atmosfera zrače kao apsolutno crno tijelo (koje prilično dobro odražava stvarnost), a ovo zračenje je u skladu sa Stefan-Boltzmannovim zakonom: energija koja se emituje s jedinične površine apsolutno crnog tijela u jedinici vremena je jednaka $I = \sigma T^4$, gdje je $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$

Stefan-Boltzmannova konstanta, a T je apsolutna temperatura površine tijela koje emituje energiju (zračenje).

Uslov toplotne ravnoteže sistema Zemlja-atmosfera izražava se sljedećim jednačinama:

$$\begin{aligned} I_0 &= I_1, \\ I_0 + I_2 &= I_3. \end{aligned}$$

Ovdje je I_0 - intenzitet Sunčevog zračenja koje pripada optičkom dijelu spektra i koje slobodno prolazi kroz atmosferu; $I_1 = \sigma T_1^4$ - intenzitet atmosferskog infracrvenog zračenja izvan Zemlje, T_1 - apsolutna temperatura gornjeg dijela radijacijskog sloja atmosfere; $I_2 = \sigma T_2^4$ - intenzitet atmosferskog zračenja prema površini Zemlje, T_2 - temperatura prizemnog sloja atmosfere; $I_3 = \sigma T_3^4$ - intenzitet infracrvenog zračenja koje se emituje s površine Zemlje, T_3 - prosječna temperatura površine Zemlje.

Budući da temperatura niže atmosfere opada s visinom ($T_2 > T_1$), to je $I_2 > I_1$. Treba napomenuti da temperature T_1 i T_3 nisu određene samo zračenjem, kao mehanizmom prijenosa toplote, već i drugim procesima, od kojih je glavni konvektivni prijenos toplote iz donjeg i gustog sloja atmosfere u stratosferu. Topli vazduh je lakši od hladnog, pa ide gore, a hladni se spušta (na slici 2 to su strelice 1 i 2, respektivno) - dolazi do konvekcije. Topli vazduh prenosi vodenu paru, važan gas staklene bašte, s površine Zemlje. Što je vazduh topliji, to može zadržati više molekula vode. Kako se para diže i hladi, kondenzuje se i formira oblake.

Iz uslova $I_2 > I_1$ slijedi da je $\sigma T_3^4 > 2I_0$, ili $T_3 > 1,2 \sqrt[4]{I_0 / \sigma}$. Ako zamislimo da Zemljine atmosfere nema ili je optički prozirna u infracrvenom dijelu spektra, onda uslov toplotne ravnoteže Zemlje s okolnim prostorom daje $I_0 = \sigma T_3^4$, tj. $T_3 = \sqrt[4]{I_0 / \sigma}$. Ispostavlja se da prisustvo atmosfere dovodi do zagrijavanja Zemljine površine jer se stvara dodatni fluks energije i ukupna snaga zračenja koje prima Zemljina površina značajno premašuje snagu zračenja koje Zemlji šalje Sunce. Ovaj efekat se naziva efekat staklene bašte. Efekat je dobio ime po pojavama u staklenicima (plastenicima) pokrivenim staklenim krovovima, jer staklo također lahko propušta Sunčevo zračenje u vidljivom dijelu spektra, ali zadržava infracrveno zračenje. Međutim,

glavni efekat svih staklenika svodi se na sprječavanje konvektivnog miješanja vazduha iz staklenika sa spoljašnjim vazduhom: čim se otvore prozori staklenika (plastenika) i uspostavi komunikacija sa spoljašnjom sredinom, efekat staklenika odmah nestaje.

Utjecaj zagađenja atmosfere na toplotnu ravnotežu

Danas je ključno pitanje: koliki su maksimalni kapaciteti vještačkih izvora toplotne energije koji se mogu instalirati na površini Zemlje bez narušavanja toplotne ravnoteže sistema Zemlja-atmosfera?

U savremenoj naučnoj literaturi opće je prihvaćeno da ireverzibilni procesi u biosferi mogu započeti već nakon povećanja prosječne temperature Zemljine površine za oko 1,5 stepeni (°C ili K).⁹ Procijenimo koje će dodatne snage toplotnog zračenja koje se oslobađa na površini Zemlje dovesti do promjene njene temperature za

$$\Delta T \approx 1,5 \text{ K.}$$

Kada temperatura Zemljine površine poraste za ΔT , intenzitet infracrvenog zračenja koje se emituje s površine Zemlje određuje se (prema Stefan-Boltzmannovom zakonu) formulom

$$I_3 = \sigma(T_3 + \Delta T)^4 \approx \sigma T_3^4 \left(1 + \frac{4\Delta T}{T_3} \right)$$

U skladu s tim, relativna promjena intenziteta emitovanog zračenja bit će jednaka

$$\frac{\Delta I_3}{I_3} \approx \frac{4\Delta T}{T_3}.$$

Snaga infracrvenog zračenja koje se emituje sa Zemljine površine data je formulom

$$P \approx I_3 \cdot S \approx 4\pi R_Z^2 I_3,$$

gdje je $R_Z \approx 6370$ km srednji poluprečnik Zemlje. Ako pretpostavimo da je prosječna temperatura Zemljine površine $T_3 \approx 288$ K, onda se dobija da snaga infracrvenog zračenja koje se emituje sa Zemljine površine iznosi $P = 2,2 \cdot 10^{14}$ kW. To znači da kada se na Zemlji pojave

9 J. De Beer (2000) *Potential for Industrial Energy-Efficiency Improvement in the Long term*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

dodatni izvori energije snage $\Delta P \approx 3,6 \cdot 10^{12}$ kW, temperatura površine Zemlje poraste za $\Delta T \approx 1,5$ K.

Trenutna snaga energije proizvedene na Zemlji dostigla je vrijednost $0,5 \cdot 10^{10}$ kW. Ako se nastavi svjetski energetski rast zabilježen posljednjih decenija (5-7% godišnje), onda će vrijednost ΔP biti dostignuta krajem ovog stoljeća. U ovom slučaju treba napomenuti jednu važnu okolnost. Gore dobijena procjena ΔP je validna ako moderna energija nije povezana s procesima koji se dešavaju tokom Zemljine apsorpcije i emisije energije. Međutim, kako se energetska industrija djelimično uklapa u opći ciklus energetskih procesa koji uključuju Zemlju, to je granična vrijednost proizvedene snage mnogo veća od gornje procjene.

Jedan od najvjerojatnijih načina ljudskog uticaja na klimu Zemlje može biti povezan s vještačkom promjenom optičkih svojstava niže atmosfere. Karakteristika moderne Zemljine atmosfere je da su njene glavne komponente - azot, kiseonik i argon - transparentne i u optičkom i u infracrvenom dijelu spektra. Zbog toga su radijaciona i apsorpciona svojstva atmosfere određena gasovima koji su prisutni u atmosferi u malim količinama i primjesama (nečistoćama).

U infracrvenom dijelu spektra radijaciona svojstva atmosfere su uglavnom posljedica odgovarajućih prijelaza iz jednog energetskog stanja u drugo molekula vode (H_2O), ugljen-dioksida (CO_2) i ozona (O_3). Atmosferski ozon apsorbuje tvrdo ultraljubičasto zračenje frekvencije 10^{15} Hz koje, kao što znamo, štetno djeluje na žive organizme. Uz to, atmosferski ozon djelimično apsorbuje Sunčevo zračenje u ultraljubičastom i optičkom dijelu spektru, čime se postiže povećanje temperature u stratosferi i mezosferi (na visinama 20-30 km). Problem atmosferskog ugljen-dioksida se sastoji u otkrivanju razloga njegovog nakupljanja u atmosferi. Kontinuirano naučno praćenje atmosferskog ugljen-dioksida pokazuje da se koncentracija molekula ugljen-dioksida u atmosferi monotonno povećava (ako se ne uzimaju u obzir sezonske oscilacije).¹⁰

10 Morgunova M. (2015) *Arctic Offshore Hydrocarbon Resource Development: Past, Present and Vision of the Future* (KTH Royal Institute of Technology).

U osnovi postoje dva mehanizma za povećanje koncentracije ugljen-dioksida. Prvo, kao rezultat vađenja i korištenja fosilnih goriva (ugalj, nafta, prirodni plin, treset), ugljenik iz unutrašnjosti Zemlje uključen je u ravnotežu između atmosferskog ugljen-dioksida i vezanog ugljenika na površini Zemlje. Tako se povećava i masa ugljen-dioksida u atmosferi. Drugo, krčenje šuma i spaljivanje šuma dovodi do smanjenja brzine fotosinteze i, shodno tome, do povećanja mase ugljen-dioksida u atmosferi.

Postavlja se važno pitanje: pri kojim koncentracijama primjesa (nečistoća) ovaj efekat postaje primjetan i može uticati na toplotnu ravnotežu sistema Zemlja-atmosfera? Za proračune procjene pretpostavit ćemo da se spektar molekula koje se dodaju atmosferi kao rezultat ljudske aktivnosti ne preklapa sa spektrom apsorpcije molekula drugih komponenti prirodne atmosfere, tj. prije uvođenja primjesa atmosfera je transparentna u rasponu talasnih dužina koje ova komponenta efikasno apsorbuje i emituje. Pojava razmatrane molekularne primjese dovodi do toga da se određeni dio ovog zračenja apsorbuje u atmosferu, a zatim se, nakon depobuđenja (deekscitacije) pobuđenih molekula, djelimično vraća na površinu Zemlje, tj. povećavaju se energija koju apsorbuje površina Zemlje i temperatura same površine.

Procijenimo koja koncentracija primjesa obezbjeđuje povećanje temperature Zemljine površine za ΔT stepeni. Zbog primjesa, na površinu Zemlje u jedinici vremena pada energija infracrvenog zračenja koja je jednaka

$$\frac{N(x)h\omega}{2\tau},$$

gdje je: $N(x)$ - koncentracija zračećih (pobuđenih) molekula primjesa na visini x razmatranog sloja atmosfere iznad površine Zemlje, $1/\tau$ - frekvencija emisije pobuđene molekule, $h\omega$ - energija emitovanog fotona, h - Planckova konstanta, ω - frekvencija centra zone maksimalnog zračenja molekula primjese (faktor $1/2$ uzima u obzir da je samo polovina emitovanih fotona usmjerena prema Zemlji). Intenzitet dodatnog zračenja zbog primjesa će biti jednak

$$\Delta I_3 = \frac{h\omega}{2\tau} \int_0^L N(x) dx,$$

$$N(x) = N(0) e^{-\frac{h\omega}{2\tau} x}$$

(ovdje je $N(0)$ - gustina pobuđenih molekula primjesa u blizini površine Zemlje, L - visina niže atmosfere). Uzimajući u obzir odnos između relativne promjene intenziteta dodatnog zračenja ΔI_3 i ukupnog intenziteta I_3 , dobijamo

$$4I_3 \frac{\Delta T}{T_3} = \frac{h\omega}{2\tau} \int_0^L N(0) e^{-\frac{h\omega}{2\tau} x} dx$$

Ova relacija uspostavlja vezu između koncentracije molekula primjese na površini Zemlje $N(0)$ i promjene površinske temperature ΔT koju stvara ta primjesa.

Zaključak

Dakle, vidimo da stanje Zemlje kao otvorenog energetskog sistema značajno zavisi od atmosfere. Atmosfera koju zagađuju ljudi tokom savremene industrijske proizvodnje, u stanju je da promijeni toplotnu ravnotežu sistema Zemlja-atmosfera. Naprimjer, klima velikih gradova u današnje vrijeme značajno se razlikuje od klime okolnog područja, što je povezano i s dodatnim oslobađanjem energije i promjenom sastava atmosfere koja se nalazi iznad velikih gradova. Proučavanja atmosfere i klime velikih gradova (posebno svjetskih industrijskih centara), omogućavaju utvrđivanje trendova klimatskih promjena na cijeloj Zemlji pod uticajem ljudskih aktivnosti i poduzimanje adekvatnih mjera za sprječavanje neželjenih klimatskih promjena. Kontinuiranim praćenjem koncentracije primjesa (nečistoća) u atmosferi i smanjenjem emisije tih primjesa može se doprinijeti održavanju toplotne ravnoteže sistema Zemlja-atmosfera, što bi doprinijelo očuvanju biodiverziteta na planeti Zemlji. Biodiverzitet podrazumijeva raznovrsnost života na Zemlji, a mi ljudi dio smo te mreže života i potpuno od nje zavisimo.

Literatura

1. K. Hasselmann (1976) *Stochastic climate models* Part I. Theory, Tellus, 28:6, 473-485, DOI: 10.3402/tellusa.v28i6.11316 (preuzeto: 20.8.2022)
2. F. Freith, R.E. West (1997) *Energy Efficiency*, CRC Press, New York.
3. WMO (2018) *State of the Global Climate in 2018, WMO Statement on the State of the Global Climate*. (preuzeto: 21.8.2022)
4. A. W. Brinkman (2008) *Physics of the Environment*, Durham University, UK.
5. UNEP (1995) *United Nation Environment Programme, Global Biodiversity Assessment*, Cambridge University Press. Cambridge.
6. J. De Beer (2000) *Potential for Industrial Energy-Efficiency Improvement in the Long term*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
7. Morgunova M. (2015) *Arctic Offshore Hydrocarbon Resource Development: Past, Present and Vision of the Future* (KTH Royal Institute of Technology).
8. <https://physicsworld.com> (pristup: 20.8.2022)
9. <https://public.wmo.int/ru>. (pristup: 21.8.2022)
10. <https://www.unesco.org/en/ideas-data/data-center> (pristup: 21.8.2022)