

Kemija termosfere

Jozinović, Iva

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Chemistry / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za kemiju**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:182:027966>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-17**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Department of Chemistry, Osijek](#)



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku – Odjel za kemiju

Sveučilišni prijediplomski studij Kemija

Iva Jozinović

KEMIJA TERMOSFERE

Završni rad

Izv. prof. dr. sc. Elvira Kovač-Andrić

Osijek, 2024.

Naziv sveučilišta: **Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku – Odjel za kemiju**

Naziv studija: **Sveučilišni prijediplomski studij Kemija**

Znanstveno područje: Prirodne znanosti

Znanstveno polje: Kemija

Znanstvena grana: Fizikalna kemija

KEMIJA TERMOSFERE

IVA JOZINOVIĆ

Rad je izrađen na: Sveučilištu u Osijeku – Odjel za kemiju

Mentor: izv. prof. dr. sc. Elvira Kovač-Andrić

Sažetak: Termosfera je gornji dio atmosfere koji karakteriziraju iznimno visoke temperature. Proteže se od 80-90 km nadmorske visine do između 500 i 1000 km iznad površine Zemlje, čineći ju najširim dijelom atmosfere. Osim niskog tlaka, u termosferi su uočene nagle varijacije vrijednosti temperature, koje rastu s nadmorskom visinom. Glavne komponente termosfere su atomski kisik, atomski dušik, helij i vodik. Kemijske reakcije u termosferi, često potaknute sunčevim zračenjem, te proces molekularne difuzije, koji razdvaja plinove prema masi, igraju važnu ulogu u ovom atmosferskom sloju. Cirkulacija u termosferi je uzrokovana atmosferskim plimama i valovima, dok se na visini od 100 do 1000 km iznad Zemljine površine pojavljuje polarna svjetlost. Ovaj fenomen nastaje zbog interakcije Sunčevog vjetra s atmosferom, a boja polarnih svjetlosti ovisi o sudarima kisikovih i dušikovih atoma s elektronima.

Ključne riječi: *Termosfera, atmosfera, kisik, kemijske reakcije, dušik, polarna svjetlost.*

Jezik izvornika: hrvatski jezik

Završni rad obuhvaća: 34 stranice, 9 slika, 37 literaturnih navoda

Rad prihvaćen:

Stručno povjerenstvo za ocjenu rada:

1. izv. prof. dr. sc. **Brunislav Matasović, predsjednik**
2. izv. prof. dr. sc. **Elvira Kovač-Andrić, mentorica i članica**
3. izv. prof. dr. sc. **Martina Šrajer Gajdošik, članica**
4. doc. dr. sc. **Olivera Galović, zamjena člana**

Rad je pohranjen: Knjižnica Odjela za kemiju, Kuhačeva 20, 31000 Osijek

Repozitorij Odjela za kemiju, Osijek

University name: **Josip Juraj Strossmayera University of Osijek – Department of Chemistry**

Name of study programme: **University Undergraduate study programme in Chemistry**

Scientific area: Natural sciences

Scientific field: Chemistry

Scientific branch: Physical chemistry

CHEMISTRY OF THE THERMOSPHERE

IVA JOZINOVIĆ

The paper was created on: Department of Chemistry

Supervisor: izv. prof. dr. sc. Elvira Kovač-Andrić

Abstract: The thermosphere is the upper part of the atmosphere characterized by extremely high temperatures. It extends from 80-90 km above sea level to between 500 and 1000 km above the Earth's surface, making it the widest part of the atmosphere. Besides the low pressure, the thermosphere experiences rapid temperature variations, which increase with altitude. Its main components are atomic oxygen, atomic nitrogen, helium and hydrogen. Chemical reactions in the thermosphere, often triggered by solar radiation, and the process of molecular diffusion, which separates gases by mass, play a significant role in this atmospheric layer. Circulation in the thermosphere is caused by atmospheric tides and waves, while polar lights appear at altitudes ranging from 100 to 1000 km above the Earth's surface. This phenomenon arises from the interaction of the solar wind with the atmosphere, and the color of the polar lights depends on collisions between oxygen and nitrogen atoms with electrons.

Key words: *Thermosphere, atmosphere, oxygen, chemical reactions, nitrogen, polar lights.*

Original language: Croatian language

Thesis includes: 34 pages , 9 figures, 37 references

Thesis accepted:

Reviewers:

1. izv. prof. dr. sc. **Brunislav Matasović, predsjednik**
2. izv. prof. dr. sc. **Elvira Kovač-Andrić, mentorica i članica**
3. izv. prof. dr. sc. **Martina Šrajer Gajdošik, članica**
4. doc. dr. sc. **Olivera Galović, zamjena člana**

Thesis deposited in : Libraray of the Department of Chemistry, Ulica Franje Kuhača 20, Osijek

Repository of the Department of Chemistry, Osijek

Zahvala

Zahvaljujem svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Elviri Kovač-Andrić na svojoj pomoći pruženoj tijekom pisanja ovog rada, predivnoj suradnji, savjetima, i na svom prenesenom znanju. Isto tako, hvala svim djelatnicima Odjela koji su me naučili puno toga tijekom studiranja.

Zahvaljujem svojim divnim prijateljicama koje su bile uz mene u svim sretnim i tužnim trenucima. Hvala na svakoj riječi ohrabrenja, svakoj šali, motivaciji i na svim uspomenama. Bez njih bi mi ovaj period života bio nezamisliv.

I napokon, zahvaljujem svojim roditeljima, sestri, bakama i djedovima bez kojih ne bih bila tu gdje sam sada. Hvala na neizmjerne ljubavi, sreći, ogromnoj podršci i svemu omogućenom. Hvala na svim životnim lekcijama i pruženom osjećaju sigurnosti. Hvala što vjerujete u mene.

Iva Jozinović

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. LITERATURNI PREGLED	2
2.1. ATMOSFERA I NJEZINI SLOJEVI	2
2.2. TERMOSFERA.....	4
2.2.1. RANI MODELI NEUTRALNE ATMOSFERE.....	6
2.2.2. IONOSFERA	7
2.3. KÁRMÁNOVA LINIJA.....	9
2.4. KEMIJSKE REAKCIJE U TERMOSFERI	9
2.4.1. PODRUČJE IONOSFERE I TERMOSFERE.....	12
2.4.2. KEMIJSKI I FOTOKEMIJSKI PROCESI.....	13
2.4.3. REAKCIJE ATMOSFERSKOG KISIKA	14
2.4.4. REAKCIJE ATMOSFERSKOG DUŠIKA	15
2.4.5. DUŠIKOVI OKSIDI.....	15
2.4.5.1. NASTAJANJE DUŠIKOVIH OKSIDA.....	16
2.4.5.2. POBUĐENA STANJA DUŠIKA	17
2.4.6. REAKCIJE RADIKALA I IONA.....	18
2.5. ISTRAŽIVANJA TERMOSFERE.....	19
2.5.1. ENERGETIKA TERMOSFERE.....	21
2.6. SUNCE I SUNČEV VJETAR	21
2.7. GEOMAGNETSKE OLUJE	23
2.8. POLARNA SVJETLOST	23
2.8.1. BOJE POLARNE SVJETLOSTI.....	24
2.8.2. NEGATIVNA STRANA POLARNE SVJETLOSTI.....	26
3. ZAKLJUČAK	27
4. POPIS LITERATURE	28

1. UVOD

Termosfera je dio atmosfere koji je dobio naziv zbog fotokemijskih procesa i aktivnosti Sunca koji u njoj prevladavaju te zbog toga što u njoj razrijeđeni plinovi mogu dostići iznimno visoke temperature, ali zbog nedovoljnog broja molekula plinova nema prijenosa topline. Smještena je od 80-90 km nadmorske visine do između 500 i 1000 km iznad same površine Zemlje, a smatra se najširim dijelom Zemljine atmosfere. Osim znatno manjeg tlaka, u termosferi su uočene i nagle varijacije u temperaturama pri čemu se porastom visine povećava i temperatura [1]. U područje termosfere pripada i takozvana Kármánova linija koja zapravo predstavlja granicu atmosfere i svemira, a nalazi se na oko 100 km iznad površine Zemlje [2]. Glavne komponente koje su prisutne u termosferi su atomski i molekularni kisik, atomski dušik, helij i vodik. Uz sve kemijske reakcije koje se odvijaju u termosferi, a najčešće su uzrokovane sunčevim zračenjem, važan je i proces molekularne difuzije koji je zaslužan za gravitacijsko razdvajanje na temelju atomske ili molekulske mase. Cirkulacija u termosferi uzrokovana je atmosferskim plimama i valovima [1]. Osim toga, u području termosfere, točnije na visini od 100 do 1000 kilometara iznad Zemljine površine nastaje i polarna svjetlost. Takozvani fenomen svjetlosti nastaje zbog Sunčevog (solarnog) vjetra. Polarna svjetlost se pojavljuje u nekoliko različitih oblika i boja, a najbolje je vidljiva na polovima Zemlje. Razlika u boji zapravo ovisi o prisutnom dušiku, odnosno kisiku. Ukoliko u Zemljinoj atmosferi dođe do sudara kisikovih atoma s elektronima, svjetlost će biti zelena, a ako se radi o dušikovim atomima, svjetlost će biti ljubičasta [3].

Cilj rada je analizirati različite kemijske procese u području termosfere te njihov utjecaj na sastav termosfere i interakcije s geomagnetskim poljem, što će pridonijeti boljem razumijevanju sastava, dinamike i ponašanja kemijskih vrsta u ovom dijelu atmosfere.

2. LITERATURNI PREGLED

2.1. ATMOSFERA I NJEZINI SLOJEVI

Atmosfera je Zemljin plinoviti omotač koji pruža zaštitu od ultraljubičastog štetnog zračenja. Također, zaslužna je za smanjenje razlika u temperaturama između dana i noći te za zagrijavanje Zemljine površine i ključna je za postojanje života na Zemlji. Sama atmosfera je podijeljena na nekoliko slojeva, odnosno visinskih područja i svi ti dijelovi atmosfere su usko povezani. Postoji više podjela atmosfere, a najčešća je podjela po promjeni temperature. Osim glavnih atmosferskih slojeva (troposfera, stratosfera, mezosfera, termosfera, egzosfera), postoje još i međuslojevi čije granice nisu precizno određene: tropopauza, stratopauza i mezopauza. Tropopauza označava područje između troposfere i stratosfere, stratopauza označava područje između stratosfere i mezosfere, a mezopauza označava područje između mezosfere i termosfere. Podjela atmosfere prema kemijskom sastavu obuhvaća dva glavna sloja: heterosfera¹ i homosfera², a međusloj koji se nalazi između njih naziva se turbopauza [4]. Kao što je vidljivo na Slici 1, prema podjeli po promjeni temperature, najniži sloj atmosfere je troposfera.

Naziv troposfera potječe od grčke riječi *tropos* koja ima značenje „promjene“, pa stoga ovaj sloj atmosfere karakteriziraju stalne promjene meteoroloških parametara, miješanja zraka, turbulencije i slično. Troposfera je za život najvažniji sloj atmosfere, sadrži 99 % vodene pare koja je prisutna u atmosferi i zbog toga je jako važna u kontroli temperature. Drugim riječima, u troposferi se nalazi većina oblaka i većina vremenskih promjena događa se upravo u troposferi. Temperatura, ali isto tako tlak i gustoća zraka, imaju najveću vrijednost pri dnu troposfere [1, 5].

Stratosfera je sloj atmosfere koji je viši od troposfere. Naziv stratosfera dolazi iz grčke riječi *stratos* koja se prevodi kao sloj, a upravo je slojevitost pridjev koji bi najbolje opisao ovaj sloj atmosfere. Izuzev vrlo male količine vodene pare koja je prisutna u stratosferi, ona je po kemijskom sastavu slična troposferi. Sadrži i onečišćujuće kemijske vrste, u njoj je uočena prisutnost klorofluorouglijika³ (eng. *Chlorofluorocarbon*, CFC) i dušikovih oksida [1].

¹ Sloj atmosfere u kojem se plinovi odvajaju molekularnom difuzijom s povećanjem nadmorske visine tako da lakše vrste postaju brojnije u odnosu na teže vrste.

² Sloj u kojem su plinovi većinom ujednačeni u svom kemijskom sastavu zbog kretanja zraka koji miješa komponente atmosfere.

³ Netoksične, nezapaljive kemikalije koje sadrže atome ugljika, klora i fluora, koriste se u proizvodnji aerosolnih sprejeva i kao rashladna sredstva.

Idući sloj nakon stratosfere je mezosfera koja je dobila naziv po grčkoj riječi *mesos* koja označava sredinu. Mezosfera se smatra najtanjim slojem atmosfere, a gustoća zraka u njoj je jako niska. Osim toga, tlak u mezosferi je do 10 000 puta manji od površinskog tlaka što onemogućava proučavanje ovog sloja atmosfere jer nizak tlak nije pogodan za svemirske letjelice [1].

Iznad mezofere, je termosfera. Između mezofere i termosfere postoji takozvana mezopauza, odnosno sloj koji dijeli ova dva atmosferska sloja. Termosferu karakterizira porast temperature proporcionalan porastu visine i u njoj vrijednosti temperature dosežu čak i do 1500 °C. Kao što je već spomenuto, termosfera se proteže otprilike od 80-90 km nadmorske visine sve do 500-1000 km iznad Zemljine površine. Prvi dio termosfere se naziva još i ionosferom (ionosfera se nalazi do 400 km iznad površine Zemlje). U tom dijelu termosfere se reflektiraju radio valovi sa Zemlje i provodi se električna struja. Termosfera je također poznata po tome što se u njoj javlja polarna svijetlost, a u njoj se nalazi i Međunarodna svemirska postaja [6].

Vanjski dio atmosfere, odnosno egzosfera, prostire se do otprilike 9500 km iznad Zemljine površine. To je sloj koji označava područje prelaska između atmosfere i vanjskog svemira. U donjem sloju egzofere nalazi se magnetosfera, to jest sloj u kojem dolazi do strujanja nabijenih čestica zraka na koje utječu Zemljina magnetska polja. Vrh egzofere naziva se još i geokoronom, a označava granicu atmosfere vidljive iz svemira [7, 6].

U skorije vrijeme, znanstvenici su otkrili da i viši dijelovi atmosfere imaju učinak na vremenske uvijete koji imaju brojne utjecaje na globalnu klimu i okoliš. Poznato je da atmosfera omogućuje život na Zemlji opskrbljujući Zemlju plinovima koje živa bića koriste u metaboličkim procesima te da štiti površinu Zemlje od brojnih meteorita⁴, štetnog elektromagnetskog zračenja, subatomskih i atomskih čestica. Zbog toga je proučavanje gornjih dijelova atmosfere postalo vrlo značajno. Samim time, važno je i razumjeti procese u atmosferi, odnosno ponašanje cijele atmosfere kako bi se izbjeglo njeno nepovratno oštećenje [8].

Relevantno proučavanje atmosfere započelo je 1643. godine kada je talijanski znanstvenik Torricelli uočio da se u atmosferi mora primijeniti tlak u smislu u kojem se promatra tlak danas. On je zaključio da težina svog zraka u stupcu koji se proteže do vrha atmosfere mora primijeniti silu koja se može izmjeriti težinom stupca tekuće žive koju može podržati. Iz visine takvog stupca žive (oko 760 mm) zaključio je kako atmosferski tlak na razini mora iznositi otprilike 1,03 kg/m². Znanstvenici su došli do zaključka da bi, ako bi se barometar (uređaj za mjerenje tlak) postavio na veće nadmorske visine, stupac atmosfere bio manji te samim time bi i stupac podržane žive bio

⁴ Svemirsko kamenje koje pada na Zemljinu površinu.

manji što bi ukazivalo na smanjeni tlak. Francuski znanstvenik Pascal je u svrhu testiranja ove teorije, odnio Torricellijev instrument za mjerenje tlaka u Francusku te izmjerio tlak na nadmorskoj visini od 1465 m. Rezultati su bili očekivani, odnosno zaključio je da povišenjem nadmorske visine dolazi do snižavanja tlaka. Mjerne jedinice koje se koriste za tlak su dobile nazive prema ova dva znanstvenika; Pa (Pascal) i Torr (Torricelli) [8].



Slika 1. Slojevi Zemljine atmosfere. Slika prilagođena prema izvoru [37]

2.2. TERMOSFERA

Termosfera je dio, odnosno sloj atmosfere koji podrazumijeva područje u kojem se nalazi prijelaz iz zraka u svemir. Važnost ovog atmosferskog sloja za uvjete koji vladaju u nižim slojevima atmosfere i utječu na naš svakodnevni život je uočen relativno nedavno. Zanimljiva je činjenica da se nije obraćala pozornost na samu termosferu ili se gotovo ništa nije znalo o njoj, a vjerojatno su bili poznati neki od mnogih „fenomena“ koji se zbivaju upravo u termosferi. Na slici 2 su prikazane neke od zapanjujućih pojava koje se odvijaju u ovom atmosferskom sloju, a to su aureole ili polarna svijetlost te zvijezde padalice. U ovom dijelu atmosfere se nalazi i Međunarodna svemirska postaja [8].

Granicu, odnosno visinu na kojoj atmosfera prelazi u međuplanetarni prostor nije lako precizno definirati, ali se termosfera smatra zadnjim dijelom atmosfere između Zemlje i svemira. Upravo

ta činjenica određuje neke od glavnih karakteristika termosfere jer svo zračenje koje ulazi u okoliš, mora prvo proći kroz termosferu prije nego uđe u niže atmosferske slojeve i počne utjecati na živi svijet. Unutar termosfere se odvijaju izbalansirani procesi, a često sami detalji tih procesa ovise o tome koje zračenje ne može proći u atmosferu [1, 8].

Iako se smatra da termosfera počinje na 80-90 km nadmorske visine, na visini od 110 km iznad Zemljine površine nalazi se turbopauza koja zapravo označava donju granicu termosfere i ona se smatra područjem gdje prestaju atmosferske turbulencije. Unatoč udaljenosti termosfere od površine Zemlje, ona je mnogim znanstvenicima unazad posljednjih stotinjak godina privukla pozornost zbog mnogih nepoznanica vezanih za nju. Razlog tomu je činjenica da termosfera posjeduje nekoliko jedinstvenih svojstava koja su omogućila otkrivanje njenog postojanja mnogo prije nego je bilo tehnički moguće proučavati čak i niže slojeve atmosfere. Kako je proučavanje viših dijelova atmosfere bilo omogućeno, troposfera se smatrala domenom meteorologa, a proučavanjem termosfere se razvila atmosferska znanost koja se razlikovala od meteorologije [8].



Slika 2. Prikaz pojava u termosferi [11]

Kemijski sastav donje termosfere ne razlikuje se uvelike od kemijskog sastava gornje i srednje atmosfere, a glavne komponente ovog dijela termosfere čine dušik (N_2) i kisik (O_2). U višim dijelovima termosfere glavna komponenta postaje atomski kisik (O) koji se pojavljuje zbog

fotodisocijacije⁵ i molekularne difuzije⁶ na velikim visinama. Zahvaljujući molekularnoj difuziji čestice migriraju u svemiru, odnosno dolazi do prijenosa mase. Sama difuzija ovisi o temperaturi, viskoznosti medija i veličini čestica [13].

U termosferi, molekule kisika i dušika podliježu zračenju i na njih utječu Sunčeve energetske čestice što dovodi do cijepanja molekula i nastanka atomskog kisika i dušika pri čemu se oslobađa toplina. Temperatura termosfere se povećava s povećanjem visine jer atomski kisik i dušik ne mogu zračiti toplinu [14]. Unutar termosfere čestice plinova se toliko rijetko sudaraju pa se plinovi donekle razdvajaju na osnovu kemijskih elementa koje sadrže. Energetski ultraljubičasti i rendgenski fotoni⁷ sa Sunca također mogu razdvajati molekule unutar termosfere [15].

Temperatura se u nižim slojevima termosfere naglo penje te se stabilizira na visinama oko 200-300 km iznad površine Zemlje. Preko dana je temperatura viša za otprilike 200°C nego preko noći, a s obzirom na to da aktivnost Sunca uvelike utječe na temperaturu u termosferi, ona može biti i do 500 °C viša kada je aktivnost Sunca povećana kroz duži vremenski period. U gornjem dijelu termosfere temperature se mogu kretati od oko 500 °C pa sve do 2000 °C. Osim visokih temperatura, termosferu karakterizira i jako mala gustoća zraka, a promjene u gustoći termosferskog zraka na orbitalnim visinama, koje mogu biti uzrokovane zagrijavanjem i širenjem termosfere, stvaraju otpor brojnim satelitima koji se nalaze u termosferi [15].

S obzirom na to da se veliki dio rendgenskog i ultraljubičastog zračenja Sunca apsorbira u termosferi, u razdobljima visoke solarne aktivnosti, kada Sunce emitira više visokoenergetskog zračenja zbog izbacivanja koronalne mase ili solarnih oluja, povećana apsorpcija zračenja u termosferi uzrokuje njezino zagrijavanje, a samim time i proširenje. To znači da visina vrha termosfere, odnosno termopauze može varirati [15].

2.2.1. Rani modeli neutralne atmosfere

Atmosfera se prema svom kemijskom sastavu i građi može smatrati idealnim plinom koji se sastoji većinski od molekula i atoma, a samo mali udio čine nabijene čestice na koje utječe geomagnetsko polje. Glavne karakteristike neutralne atmosfere su njena temperatura, gustoća, kemijski sastav i kretanje. Raspodjela neutralnih čestica prema visini ne može biti određena bez poznavanja je li

⁵ Kemijska reakcija u kojoj se spoj razgrađuje pod utjecajem fotona, predstavlja interakciju jednog ili više fotona s jednom ciljnom molekulom.

⁶ Toplinsko gibanje čestica plina ili tekućine na temperaturama iznad apsolutne nule.

⁷ Sitne čestice koje se sastoje od valova elektromagnetskog zračenja.

atmosfera potpuno izmiješana ili jesu li gustoće kontrolirane kemijskim reakcijama ili nekakvim procesima (poput vjetrova). Također, važno je uzeti u obzir i to da molekularni kisik i dušik, koji su prisutni u atmosferi, mogu disociirati u atome pod utjecajem ultraljubičastog zračenja, a ti atomi se zatim mogu raspršiti na viša ili niža visinska područja ili se pak rekombinirati u kemijskim procesima [8].

Temperatura atmosfere može se odrediti kada su identificirani izvori topline i visina na kojoj se toplina taloži, uzimajući u obzir i važnost procesa uklanjanja topline poput zračenja, provođenja i konvekcije. Struktura atmosfere može se utvrditi pomoću mjerenja tlaka ili gustoće jer su temperatura, tlak i gustoća povezani zakonom za idealni plin koji je opisan u jednadžbi 1:

$$p = n k T \quad (1)$$

gdje se p odnosi na tlak, n na množinu tvari, k na Boltzmannovu konstantu i T na termodinamičku temperaturu [8].

Kako bi se mogao konstruirati model neutralne atmosfere potrebno je uzeti u obzir nekoliko parametara poput mase koja će se koristiti u izračunima. Ako je atmosfera potpuno izmiješana, može se koristiti prosječna masa. Ako nema turbulencija, plinovi će se raspodijeliti zbog gravitacije te će se mase molekula ili atoma plina morati uzeti u obzir. Zbog toga je važno prvo utvrditi jesu li plinovi izmiješani ili ne, koji je temperaturni profil te koje su vrijednosti gustoće ili tlaka na određenoj razni atmosfere [8].

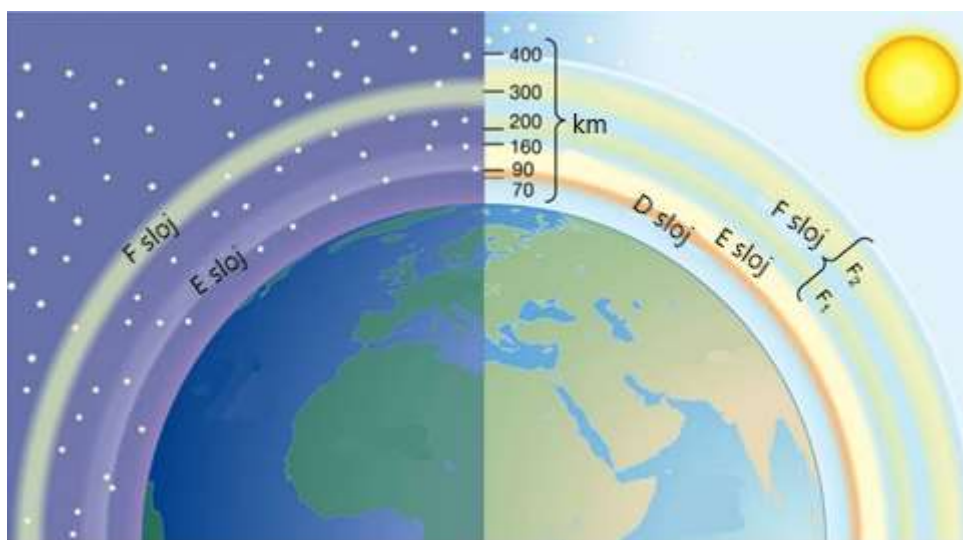
2.2.2. Ionosfera

Prije 1940-ih godina je bilo malo informacija o samoj ionosferi, a sve poznate informacije su se temeljile na prodiranju različitih frekvencija u različite slojeve ionizacije. Za određivanje koncentracije elektrona u termosferi je bilo potrebno puno rada i vremena, a mjerenja su omogućavala samo određivanje koncentracija na visinama ispod maksimalne visine ionosfere. Prije nego što je bio poznat sastav neutralne visoke atmosfere, izvor ionizacije nije bio poznat. Znalo se da postoji nešto što se trebalo ionizirati, odnosno nešto što je proizvodilo ionizaciju, pa se pretpostavilo da se izvor zračenja nalazi iznad atmosfere te da to zračenje uklanja elektrone iz neutralnih atoma ili molekula pri čemu nastaju ioni i elektroni koji čine ionosferu. Prema izračunima je zaključeno da ultraljubičasta energija Sunca posjeduje dovoljno energije za tako nešto. Prema tome, zaključeno je da su dobri kandidati za ionizaciju bili molekularni kisik i dušik. U slučaju da su energetske solarni ultraljubičasti fotoni prisutni u dovoljnom broju da ioniziraju

gornju atmosferu, pretpostavlja se da bi postojalo i ultraljubičasto zračenje manje energije koje bi moglo razbiti molekule kisika i dušika na njihove atomske sastavnice [8].

Ionosfera je električni vodljivi sloj (plazma) koji nastaje ionizacijom atomskog kisika i dušika pomoću visokoenergetskog ultraljubičastog te rendgenskog solarnog zračenja. Proteže se od sredine mezosfere do magnetosfere⁸, a cirkulira na dnevnim bazama jer dnevna izloženost Suncu, odnosno njegovom zračenju, uzrokuje ionizaciju atoma sve do mezosfere. Noću, kada sunčevo zračenje više ne stupa u interakcije s atomima prisutnim u termosferi, ionosfera se urušava [14].

Ionosfera je formirana fotoionizacijom Sunčevim rendgenskim zrakama i EUV zračenjem (eng. *Extreme Ultraviolet*) te je podijeljena na D, E i F slojeve. Zbog toga što može reflektirati valove u različitim pojasevima, ima važnu ulogu u navigaciji i komunikaciji, a zbog ionski neutralnih reakcija koje se stalno događaju u svim područjima, termosfera i ionosfera su blisko povezane [16].



Slika 3. Slojevi ionosfere. Slika prilagođena prema izvoru [17]

D, E i F slojevi ionosfere nemaju strogo određene granice i nadmorske visine na kojima se pojavljuju te variraju tijekom dana. Najniži je D sloj (na visini od 70 do 100 km), zatim E sloj (Kennelly-Heavisideov sloj, nalazi se na visini od 90 do 130 km), a najviši dio ionosfere čini F sloj (na visini između 150 i 250 km). Ovi slojevi ionosfere se ne smatraju zasebnim slojevima, nego se shvaćaju kao ionizirana područja uklopljena u glavne atmosferske slojeve. Stoga se D sloj uglavnom formira u gornjem dijelu mezosfere, E sloj u donjem dijelu termosfere, a F sloj u višim dijelovima termosfere. Visina, udio ioniziranih čestica, ali čak i postojanje područja ionosfere

⁸ Područje svemira koje okružuje Zemlju i u kojem dominira Zemljino magnetsko polje, a ne magnetsko polje međuplanetarnog prostora.

varira. S obzirom na to da rendgenske zrake i ultraljubičasto Sunčevo svjetlo tijekom dana osiguravaju energiju koja oslobađa elektrone iz atoma ili molekula i na taj način proizvodi kontinuiranu opskrbu ionima i slobodnim elektronima, tijekom dana se stvara više iona nego što ih se gubi spajanjem u neutralne atome ili molekule. Dakle, noću kada nema Sunčeve svjetlosti, dolazi do rekombinacije iona i elektrona i na taj način se broj iona smanjuje. Tijekom većeg dijela noći D sloj potpuno nestaje, a E sloj slabi jer broj iona naglo pada. Ujutro, pojavom Sunčeve svjetlost, D i E slojevi se ponovno pune ionima. F sloj ostaje postojan tijekom cijele noći jer se ovdje ioni i elektroni sporo rekombiniraju, a tijekom dana se dijeli na gornji sloj F2 i donji sloj F1 (Slika 3) [17].

2.3. KÁRMÁNOVA LINIJA

Karmanova linija je najrasprostranjenija, ali ipak ne univerzalno prihvaćena granica između atmosfere i svemira. Obično se postavlja na 100 km iznad Zemljine površine, a postoji više prijedloga o tome na kojoj visini bi se ova granica trebala nalaziti. Neki autori smatraju da velike promjene svojstava atmosfere čine beskorisnim lociranje granice između atmosfere i svemira, dok drugi smatraju da ta granica treba biti definirana i da postoji [12]. To je teorijska linija nakon koje zrakoplov ne može letjeti samo uz pomoć aerodinamičkih sredstava osim ako ne postigne prvu kozmičku brzinu⁹ [9].

2.4. KEMIJSKE REAKCIJE U TERMOSFERI

Više je izvora energetske čestice (poput protona, elektrona i nekih težih iona) koje su prisutne u cijeloj atmosferi, a neki od najčešćih izvora iz koji se ove čestice pojavljuju su Sunce, odnosno veliki događaji solarnih čestica (eng. *Solar particle event*, SPEs), aurore ili polarna svjetlost, zračni pojasevi (tijekom geomagnetskih oluja) ili pak izvori izvan Sunčevog sustava. Te čestice imaju različite energetske spektre i različito djeluju sa zemaljskim magnetskim poljem te stoga utječu na različite nadmorske visine i geografska područja [10].

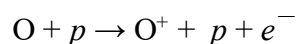
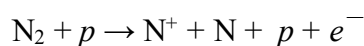
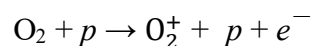
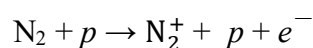
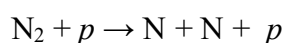
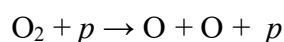
Solarne čestice dolaze iz Sunčevog vjetra koji služi kao kontinuirani odljev plazme iz solarnih koronalnih rupa tijekom solarnog ciklusa. Ove čestice se mogu grupirati i na taj način biti izvor polarne svjetlosti. Visoka geomagnetska aktivnost povezana je s povećanim padom elektrona i

⁹ Poznata i kao orbitalna brzina, preko 20 puta veća od brzine zvuka.

protona polarne svjetlosti pri čemu elektroni ubrzavaju dovoljno kako bi pali u nižu termosferu. Padanje energetskih čestica utječe na kemijski sastav atmosfere zbog lančanih reakcija koje počinju s reakcijom čestica s materijom što može dovesti do pobuđenog stanja, disocijacije, disocijativne ionizacije ili ionizacije najzastupljenijih vrsta. U termosferi, u području gdje nastaje polarna svjetlost, dolazi do primarnog pobuđenog stanja kao i formiranja pobuđenih stanja N_2 , O_2 i O te njihovih iona što je izvor polarne svjetlosti [10, 26].

Kemijski sastav termosfere i srednjeg dijela atmosfere proučavan je pomoću uređaja poput masenih spektrometara pri čemu je zaključeno da energetske čestice mogu uvelike utjecati na sam sastav atmosfere. Padom u atmosferu, energetske čestice gube svoju energiju zbog sudara s najzastupljenijim vrstama, a to su N_2 , O_2 , i O (u gornjoj termosferi također i He i H). Primarna interakcija koja vodi prema promjeni kemijskog sastava u području mezofere i niže termosfere su disocijacija i disocijativna ionizacija kisika i dušika, kao i ionizacija O_2 , N_2 i O . Reakcije mogu izazvati pobuđena stanja N , O , N_2^+ , O_2^+ , N^+ ili O^+ te također mogu biti izvor sekundarnih elektrona koji potom mogu reagirati s okolnim zrakom na sličan način. Sve to pokreće lančanu reakciju koja traje sve dok zadnje primarne čestice i svi sekundarni elektroni ne dostignu prosječnu kinetičku energiju okolnog zraka [10].

Reakcije disocijacije i ionizacije kisika i dušika, gdje je p primarni proton, elektron, ion ili sekundarni elektron:

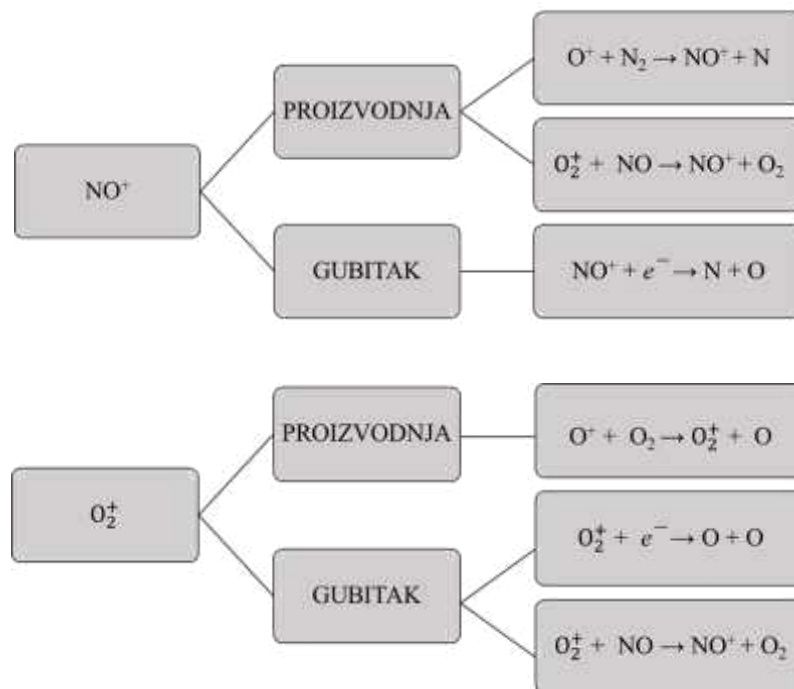


Pomoću ionizacijskih reakcija, u termosferi su uočene modifikacije u atomskom vodik i molekulskom kisiku. Neutralni atomski vodik je teško izmjeriti izravno u termosferi, ali pomoću omjera spektroskopski izmjerenog ioniziranog vodika i ioniziranog kisika te mjerenja neutralnog kisika, količina neutralnog vodika izračunata je za područje ispod 250 km gdje vlada kemijska ravnoteža. Rezultati tih mjerenja su pokazali da je u termosferi, koncentracija vodika u svim geografskim širinama, veća noću nego danju. Također, pojavljuje se i varijacija povezana s

godišnjim dobima kada je zimi koncentracija vodika na sjevernoj hemisferi veća od one na južnoj hemisferi. To potvrđuje takozvana zimska „izbočina“ vodika slična izbočini helija koja je još ranije otkrivena. Na isti način određeno je što se događa s vodikom tijekom magnetskih oluja. Tijekom oluje koncentracija vodika opada, a temperatura vodika se povećava [8].

U termosferi je također teško izravno izmjeriti i molekularni kisik pa se stoga računanju koncentracije kisika pristupa pomoću ionske kemije. Ovo mjerenje je malo kompliciranije, ali rezultati također ukazuju na prisutnost izbočine molekularnog kisika u ljetnoj termosferi do čega dolazi zbog fotodisocijacije molekularnog kisika tijekom razdoblja niske solarne aktivnosti [8].

Pomoću ultraljubičastog spektrometra dušikovog monoksida otkriveno je da se koncentracija dušikovog monoksida na visini blizu 105 km mijenja ovisno o geografskoj širini, dužini i solarnoj aktivnosti.



Slika 4. Prikaz procesa odgovornih za proizvodnju i gubitak molekularnih iona dušikovog monoksida i kisika

Noću, iznad magnetskog ekvatora, primarni procesi koji su odgovorni za proizvodnju i gubitak molekularnih iona dušikovog monoksida i kisika su identificirani kao na slici 4.

Naime, usporedbom teorije kemijske ravnoteže s mjerenjima pomoću ionskog spektrometra, vidljivo je da teorija kemijske ravnoteže nije dovoljno precizna u donjem dijelu F sloja ionosfere gdje postoji naglo sniženje gustoće ioniziranog atomskog kisika. Prema tome, dinamički učinci su

od velike važnosti, a isto tako je moguće i da su neka povećanja ioniziranog dušikovog monoksida zapravo posljedica podizanja plazme s nižih nadmorskih visina [8].

Na visini od otprilike 100 km se raspada većina meteora i upravo to područje je izvor željeza, a zbog dinamičkih procesa dolazi do podizanja tog željeza u F sloj ionosfere [8].

Dva čimbenika koji imaju najveći utjecaj na kemiju termosfere, odnosno kemiju cijele atmosfere su Sunčeva energija zračenja i funkcionalne skupine¹⁰. Sunčeva energija zračenja, uglavnom u ultraljubičastom dijelu spektra omogućuje unošenje visoke razine energije u individualne molekule plina pri čemu dolazi do pokretanja niza kemijskih reakcija. S druge strane, funkcionalne skupine služe kao najvažniji reaktivni intermedijeri [18].

2.4.1. Područje ionosfere i termosfere

Ionosfera i termosfera su dinamički povezani sustav (tzv. IT područje) u koji su osim kemijskih i fizičkih procesa uključene i interakcije s drugim dijelovima atmosfere putem prijenosa mase i energije. IT područje je usko povezano s magnetosferom preko elektromagnetskih polja, energetski nabijenih čestica i neutralnih plinova. Nadalje, magnetosfera, koja je kontrolirana svojstvima solarnog vjetra, značajan je izvor energije za IT područje. Odgovor termosfere i ionosfere na ulaze energije iz magnetosfere je zagrijavanje, koje nastaje sudarom između iona i neutralnih vrsta što može povećati temperature na velikim geografskim širinama [33, 34].

Glavna karakteristika IT područja, po čemu se razlikuje od mezosfere je ta da njena energetska ravnoteža potječe izvana, odnosno termosferom prvenstveno upravljaju različiti vanjski izvori, a raznoliki mehanizmi pretvaraju i redistribuiraju energiju termosfere. Glavni unos energije u termosferu predstavlja solarna energija u obliku ultraljubičastog zračenja pri čemu su primarni adsorbensi¹¹ ozon¹² (O₃), molekulski kisik (O₂), atomski kisik (O) i ugljikov dioksid (CO₂). Atomski kisik, koji je najzastupljenija komponenta u višim područjima atmosfere, najviše apsorbira solarno ekstremno ultraljubičasto zračenje, a ostale valne duljine se apsorbiraju bliže površini Zemlje. Prema tome, molekulski kisik apsorbira zračenje pri valnim duljinama od 100 nm do 200 nm, a ozon pri 200 nm do 300 nm. Sunčeva čestična energija u obliku taloženja energetskih čestica plazme solarnog vjetra (elektroni, protoni, neutroni i ioni visoke energije) predstavlja još jedan važan izvor energije. Taloženje energetskih čestica je važan čimbenik u

¹⁰ Atom, molekula ili ion koji ima najmanje jedan nesporeni elektron što ga čini iznimno kemijski reaktivnim.

¹¹ Čvrste tvari koje imaju veliku aktivnu površinu i posjeduju sposobnost adsorpcije (npr. aktivni ugljen).

¹² Alotropna modifikacija kisika koja se u vrlo kratkom vremenu može raspasti na običnu molekulu kisika.

dinamici termosfere, a često je i najvažniji izvor ionizacije. Ono značajno utječe na sadržaj iona što pokreće ionski neutralne reakcije, a osim toga utječe i na sam sastav atmosfere zbog proizvodnje hidroksilnih funkcionalnih skupina ($\text{HO}\cdot$) i dušikovih oksida ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) u mezosferi i termosferi [7, 20].

Jedan od glavnih izvora zagrijavanja IT područja, koji je uvelike povezan s magnetosferom je Jouleovo zagrijavanje¹³ koje je uzrokovano sudarima između iona i neutralnih tvari. U tom području su uočljive razlike u atmosferskim tokovima koji se sastoje od neutralnih vrsta te nabijenih čestica u odnosu na potpuno neutralne tokove jer su nabijene čestice podložne dodatnim električnim i magnetskim silama [20, 33].

Kemijsko zagrijavanje također ima različite utjecaje na IT područje. Neki od tih utjecaja su povećavanje električne vodljivosti i brzine zagrijavanja, odnosno širenja ionosfere prema gore. Velike količine kemijske potencijalne energije talože se u ovom području atmosfere tijekom disocijacije ozona i molekuskog kisika. Neutralne vrste koje imaju važnu ulogu u ravnoteži zračenja, odnosno neutralne vrste na koje može utjecati taloženje energije su ozon, voda, ugljikov dioksid i aerosoli¹⁴. Upravo te vrste igraju važnu ulogu u kemiji termosfere [20].

Glavni izvori ionizacije u termosferi su ionizacija atomskog kisika i molekuskog dušika fotonima i fotoelektronima, dok fotoionizacija atomskog kisika predstavlja manji izvor molekuskog kisika [21].

2.4.2. Kemijski i fotokemijski procesi

Kemijske vrste koje apsorbiraju ultraljubičasto Sunčevo zračenje mogu izazvati fotokemijske reakcije koje se inače ne bi odvijale u odsustvu svjetlosti. Stoga se, fotokemijske reakcije čak i u odsustvu kemijskog katalizatora, odvijaju pri temperaturama puno nižim od onih koje bi inače bile potrebne. Te reakcije, koje su potaknute Sunčevim zračenjem, imaju važnu ulogu u određivanju stanja kemijskih vrsta u cijeloj atmosferi. Postoje tri glavne vrste u atmosferi koje su relativno reaktivne i nestabilne, a uključene su u kemijske procese koji se odvijaju u cijeloj atmosferi. Jedna od tih vrsta su elektronski pobuđene molekule koje nastaju kada stabilne molekule apsorbiraju energetska zračenja u ultraljubičastom ili vidljivom dijelu spektra. Molekula može imati nekoliko mogućih pobuđenih stanja, ali uobičajeno ultraljubičasto ili vidljivo zračenje je dovoljno energično

¹³ Fizički učinak kojim prolazak struje kroz električni vodič proizvodi toplinsku energiju.

¹⁴ Male lebdeće čestice prisutne u atmosferi koje imaju značajan utjecaj na klimu, vrijeme, zdravlje i ekologiju.

da pobudi molekule samo na neke niže razine energije. Priroda pobuđenih stanja može se razumjeti pomoću promatranja rasporeda elektrona u molekuli. Većina molekula ima paran broj elektrona, a elektroni zauzimaju orbitale¹⁵ s tim da najviše dva elektrona sa suprotnim spinom mogu zauzeti istu orbitalu. Dakle, apsorpcija svjetlosti može uzdignuti jedan od tih elektrona u prazan prostor orbitale više energije. Druge dvije vrste koje su uključene u kemijske procese u atmosferi su atomi ili molekularni dijelovi s nepodijeljenim elektronima, odnosno radikali te ioni koji se sastoje od elektronski nabijenih atoma ili molekularnih dijelova [18].

Za odvijanje fotokemijske reakcije reaktivna vrsta mora apsorbirati svjetlost. Ako je apsorbirana svjetlost u vidljivom dijelu Sunčevog spektra, apsorbirajuća vrsta je obojana. Primjer takve vrste u atmosferi je dušikov dioksid. Prvi korak u fotokemijskim procesima je najčešće aktivacija molekule apsorpcijom jedne jedinice fotokemijske energije karakteristične frekvenciji elektromagnetskog zračenja koje se naziva kvantom¹⁶ elektromagnetskog zračenja. Reakcije koje se događaju nakon apsorpcije fotona elektromagnetskog zračenja za nastajanje elektronski pobuđenih vrsta uvelike određuju način na koji će pobuđena vrsta izgubiti svoj višak energije [18].

Elektromagnetsko zračenje u infracrvenom dijelu spektra nema dovoljno energije za razbijanje kemijskih veza, ali može uzrokovati dobitak rotacijske energije receptorskih molekula. Energija apsorbirana kao infracrveno zračenje rasipa se kao toplina i na taj način povećava temperaturu cijele atmosfere [18].

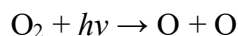
2.4.3. Reakcije atmosferskog kisika

Ciklus kisika je jako važan u atmosferskoj kemiji, geokemijskim transformacijama i životnim procesima. Smatra se da sav molekularni kisik koji je prisutan u atmosferi potječe od djelovanja fotosintetskih organizama čime se naglašava važnost fotosinteze za ravnotežu kisika u atmosferi. Molekularni kisik karakterizira činjenica da je njegovo osnovno stanje zapravo tripletno stanje s dva nesparena elektrona (³O₂) koje se može pobuditi u singularni molekularni kisik (¹O₂). To se može postići iz nekoliko procesa koji uključuju izravno fotokemijsko pobuđenje, prijenos energije iz drugih pobuđenih molekula, fotolizu ozona i visokoenergetsko stvaranje kisika. Zbog jako male gustoće zraka u gornjim dijelovima atmosfere i utjecaja ionizirajućeg zračenja, elementarni kisik na visokim udaljenostima od površine Zemlje prisutan je u više oblika. Osim O₂, gornji dio atmosfere sadrži kisikove atome u obliku pobuđene molekule O₂^{*} i ozona O₃. Atomski kisik (O)

¹⁵ Područje ili prostor u kojem je velika šansa pronalaska elektrona.

¹⁶ Najmanja diskretna jedinica (npr. kvant svjetlosti je foton, a kvant elektriciteta je elektron).

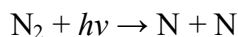
stabilan je prvenstveno u termosferi gdje je gustoća zraka toliko mala da se interakcije potrebne za kemijsku reakciju atomskog kisika događaju jako rijetko. Atomski kisik u atmosferi može postojati u osnovnom stanju (O) i pobuđenom stanju (O*), a nastaje fotokemijskom reakcijom;



S obzirom da je veza kisik-kisik jaka, ultraljubičasto zračenje u području valne duljine 135-176 nm i 240-260 nm je najučinkovitije za disocijaciju molekulskog kisika. Zbog fotokemijske disocijacije, O₂ gotovo da i ne postoji na velikim nadmorskim visinama. U području termosfere, na udaljenostima od 400 km, manje od 10% kisika dolazi u molekulskom obliku [18].

2.4.4. Reakcije atmosferskog dušika

Značajna količina dušika fiksira se u atmosferi zahvaljujući munjama koje daju visoku energiju potrebnu za disocijaciju stabilnih molekula N₂. Dio dušika također se fiksira i u procesima izgaranja, posebno u motorima s unutarnjim izgaranjem. Početak korištenja sintetičkih gnojiva uzrokovalo je zabrinutost da će procesi denitrifikacije¹⁷ u tlu dovesti do iscrpljenosti dušika na Zemlji, ali ta zabrinutost je s vremenom prerasla u zabrinutost o mogućem povećanom nakupljanju dušika u tlu, vodi i oceanima. Za razliku od kisika koji je gotovo potpuno disociran u atomski oblik u višim dijelovima atmosfere, molekulski dušik nije lako disocirati ultraljubičastim zračenjem [18]. U termosferi atomski dušik nastaje fotokemijsko reakcijom;



2.4.5. Dušikovi oksidi

U atmosferi su prisutna tri se dušikova oksida: didušikov oksid (N₂O), dušikov dioksid (NO₂) i dušikov monoksid (NO) [18].

¹⁷ Proces pretvaranja nitrata u plinoviti dušik pri čemu se uklanja bioraspoloživi dušik i vraća u atmosferu.

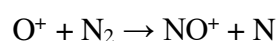
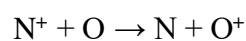
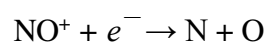
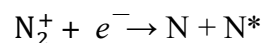
Diđušikov oksid je relativno nereaktivan i nema značajan utjecaj na kemijske reakcije u nižim slojevima atmosfere, a njegova koncentracija se naglo smanjuje već u stratosferi zbog fotokemijskih reakcija [18].

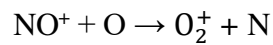
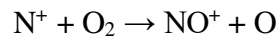
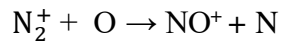
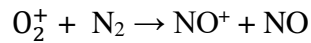
Dušikov dioksid (NO₂) je jedna od fotokemijski najaktivnijih vrsta koja je prisutna u zagađenoj atmosferi i važan je sudionik u procesu stvaranja smoga. Dušikov dioksid može apsorbirati svjetlost energije $h\nu$ pri čemu dolazi do nastajanja elektronski pobuđene molekule [18].

Dušikov monoksid je važna sporedna vrsta u gornjem dijelu atmosfere. Zbog svojih jedinstvenih svojstava, utječe na strukturu i energetiku termosfere. Primjetna je emisija njegovih rotacijsko vibracijskih razina kao izvor radioaktivnog hlađenja u termosferi na području između 120 i 200 km i predmet je brojnih istraživanja koja su mjerila emisiju kako bi se razumio njegov doprinos energiji termosfere. Infracrvene emisije dušikova monoksida (NO) posljedica su dvostupanjskih procesa u kojima prvo dolazi do stvaranja vibracijski pobuđenog dušikovog oksida, a zatim do radijacijskog de-pobuđivanja što rezultira emisijom fotona. Vibracijski pobuđen dušikov monoksid u termosferi se stvara sudarima s atomskim kisikom koji može pobuditi prvu vibracijsku razinu [22].

2.4.5.1. Nastajanje dušikovitih oksida

Stvaranje primarnih iona N₂⁺, O₂⁺, O⁺ i N⁺ početak je brze ionske kemijske reakcije koja također može značajno utjecati na neutralnu atmosferu i voditi do nastajanja NO_x (NO i NO₂). U nižim i srednjim dijelovima atmosfere potrebno je obratiti pozornost na pozitivne ione poput N⁺, N₂⁺, NO⁺, O⁺ i O₂⁺. Na nadmorskim visinama oko 75-80 km negativno nabijeni ioni postaju obilniji od elektrona na nižim nadmorskim visinama, a veliki klasteri iona postaju najobilniji oblik pozitivno nabijenih iona. Najvažnije reakcije nastajanja atomskog dušika i dušikovitog monoksida iz iona, su rekombinacije N₂⁺ i NO⁺, reakcije prijenosa naboja N⁺ ili ionski neutralne reakcije [10].

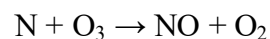
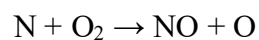




Nitrozonijev ion (NO^+) može se dobiti reakcijom prijenosa naboja koja nije izvor dušikovih oksida. Iznad 65 km nadmorske visine, učinkovita stopa proizvodnje dušikovih oksida raste s porastom nadmorske visine i postiže svoj maksimum na nadmorskim visinama većim od 130 km. Razlog tomu je važnost O_2^+ i NO^+ iona koji postaju najobilnija vrsta iona u području donje termosfere [10].

2.4.5.2. Pobuđena stanja dušika

Disocijacija i disocijativna ionizacija molekuskog dušika, kao i reakcije rekombinacije N_2^+ i NO^+ iona mogu dovesti do nastajanja atomskog dušika u osnovnom stanju ili pak u pobuđenim stanjima. Oba stanja atomskog dušika mogu stupiti u reakciju s molekulskim kisikom ili ozonom pri čemu nastaje dušikov monoksid;

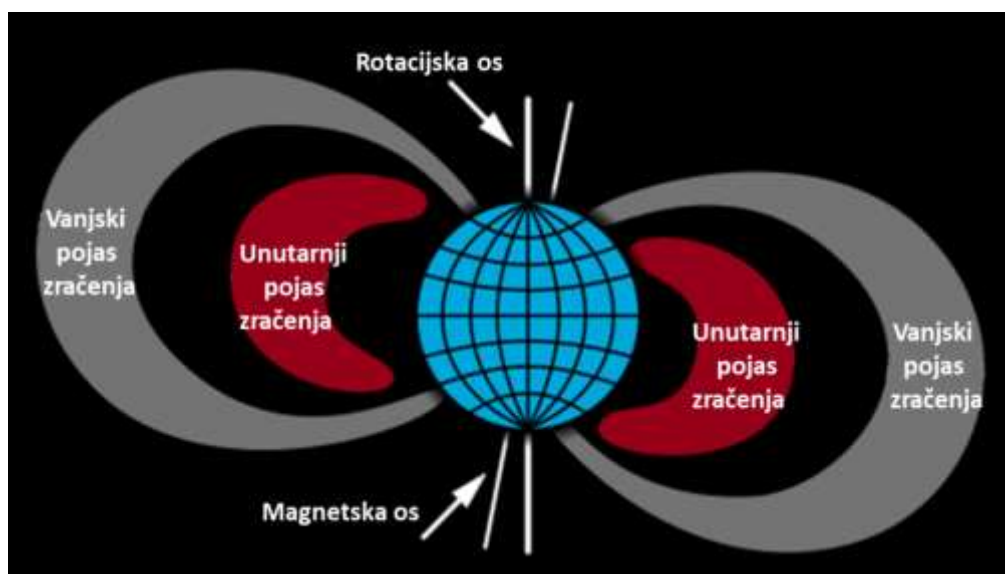


Reakcija molekuskog kisika s pobuđenim stanjem atomskog dušika je puno učinkovitija u području stratosfere, mezofere i u nižim dijelovima termosfere te predstavlja jedan od glavnih izvora dušikovitog monoksida u tim područjima. S druge strane, reakcija molekuskog kisika s osnovnim stanjem atomskog dušika uvelike ovisi o temperaturi i ona predstavlja glavni izvor dušikovitog monoksida u području termosfere na nadmorskim visinama iznad 120 km. Osnovno stanje atomskog dušika može također sudjelovati u konkurentskoj reakciji s NO koja je učinkovit mehanizam gubitka NO_x . S obzirom na to da pobuđena stanja dušika pospješuju nastanak dušikovitog monoksida, a osnovno stanje dušika može dovesti do gubitka NO_x , podjela između pobuđenih stanja i osnovnog stanja dušika je vrlo važna veličina u disocijaciji, disocijativnoj

ionizaciji i ionskoj kemiji koja određuje količinu nastalih dušikovih oksida. Na nadmorskim visinama nižim od 60 km ta podjela nije toliko važna jer su koncentracije atomskog dušika preniske da bi došlo do reakcije između N^+ i NO [10].

2.4.6. Reakcije radikala i iona

Jedna od karakteristika gornjih dijelova atmosfere je prisutnost značajnih razina elektrona i pozitivno nabijenih iona. Ti ioni mogu biti prisutni u gornjem dijelu atmosfere tijekom dugog vremenskog perioda prije nego se rekombiniraju u neutralne atome zbog uvjeta koji tamo vladaju, a ponajviše zbog razrijeđenosti, odnosno male gustoće zraka. Iz tih razloga, na nadmorskoj visini od oko 50 km počinje područje s velikom koncentracijom iona, ionosfera. Kao što je već spomenuto, jedan od glavnih izvora iona je ultraljubičasto svjetlo. U tami se pozitivno nabijeni ioni spajaju sa slobodnim elektronima i to se puno brže odvija u donjim predjelima ionosfere gdje je koncentracija iona visoka. Zbog toga se donja granica ionosfere noću podiže, a to omogućuje prijenos radio valova na puno veće udaljenosti. Zemljino magnetsko polje ima snažan utjecaj na ione u gornjem dijelu atmosfere i to je opisano takozvanim Van Allenovim pojasevima koji se sastoje od dva pojasa ioniziranih čestica koji okružuju Zemlju (Slika 5) [18].



Slika 5. Van Allenovi pojasi zračenja. Slika prilagođena prema izvoru [35]

Osim stvaranja iona fotoionizacijom, energetsko elektromagnetsko zračenje u atmosferi može proizvesti atome ili skupine atoma s nesparenim elektronima koji se nazivaju radikali. Ti radikali

su značajni jer su uključeni u većinu značajnih pojava koje su prisutne u atmosferi. Oni mogu sudjelovati u lančanim reakcijama u kojima je jedan od produkata funkcionalna skupina. Reakcijom terminacije reagiraju dvije funkcionalne skupine, lanac završava. Upravo zbog svojih nesparenih elektrona koje posjeduju, radikali imaju snažnu tendenciju uparivanja elektrona što ih čini iznimno reaktivnima, ali je važno razlikovati tu reaktivnost od nestabilnosti. S obzirom na to da je gornji dio atmosfere jako razrijeđen, na velikim nadmorskim visinama radikali mogu imati polu-život od nekoliko minuta. Radikali i pojedini atomi iz dvoatomskih plinova se mogu zadržavati u tim višim slojevima atmosfere jer mogu prijeći velike udaljenosti prije interakcije s drugim reaktivnim vrstama. S druge strane, pobuđene čestice uobičajeno imaju kratak životni vijek jer mogu izgubiti energiju zračenjem bez da reagiraju s drugom vrstom [18].

2.5. ISTRAŽIVANJA TERMOSFERE

Duboka uključenost, na početku malog broja znanstvenika, dovela je do programa istraživanja atmosfere pod nazivom „The Atmosphere Explorer“. Od ranih dana prve zvučne rakete proučavana je gornja atmosfera, a s vremenom se broj uključenih znanstvenika povećavao. Tijekom istraživačkog programa svemira izolirana mjerenja dala su mnogo novih, do tada nepoznatih informacija, a nakon što su eksperimentalne tehnike bile usavršene, mjerenja su se mogla objasniti i davala su smislene analize. Mala skupina fizičara, koji su proučavali gornju atmosferu, prepoznali su neke neobične sposobnosti koje su mogli korisnije iskoristiti ako se udruže. Konkretno, njihove sposobnosti su imale veliki potencijal za istraživanje područja atmosfere poznat pod nazivom termosfera, koju su neki od njih nazivali ignorosfera (eng. *ignorosphere*) zbog nedostatka pozornosti koja joj se posvećivala. Sateliti „The Atmosphere Explorer“, od kojih je jedan prikazan na slici 6, su na taj način postali laboratoriji pomoću kojih su znanstvenici imali priliku provoditi mnoge eksperimente unutar termosfere. Do 1969. godine, tim za proučavanje aeronomije¹⁸ identificirao je 5 tema koje bi imale koristi od detaljnog proučavanja termosfere. To se odnosilo na ionski i neutralni sastav te brzine reakcije, energetiku ionizirane atmosfere, procese koji kontroliraju spektar niskoenergetskih elektrona, procese odgovorne za pobuđivanje zračnog sjaja (eng. *airglow*) i globalnu strukturu i dinamiku neutralne atmosfere. Kako je vrijeme prolazilo i kako je tim rastao, pojavilo se i nekoliko drugih tema, a

¹⁸ Znanstveno proučavanje gornjih slojeva Zemljine atmosfere i drugih tijela Sunčevog sustava koje pokriva kemiju, dinamiku i energetske ravnoteže neutralnih i nabijenih čestica.

znanstveni cilj same misije fokusirao se na dva aspekta termosfere: njene kemijske procese i procese pretvorbe energije [8].



Slika 6. Satelit „Explorer 51“ [28]

Način na koji su razna mjerenja trebala biti korištena za sukob sa specifičnim problemima vezanim za termosferu, objavljen je 1967. godine, a jasnije je objašnjen 1969. godine. Koristilo se nekoliko instrumenata za istraživanje ionskih i neutralnih sastava te za brzine reakcija. Ioni proizvedeni u termosferi pomoću apsorpcije Sunčevog ultraljubičastog zračenja podvrgnuti su raznim reakcijama s molekulama prije no što su konačno rekombinirali. Učinkovitost kojom su se ioni pretvarali u druge vrste unutar atmosfere ovisila je o koncentraciji neutralnih čestica. Mjerenjem količine ultraljubičastog zračenja Sunca i koncentracije neutralnih čestica, znanstvenici su bili u mogućnosti izračunati koliko će se iona proizvesti. Fotoelektroni proizvedeni u termosferi su glavni izvor energije za zagrijavanje iona i elektrona. Pomoću spektra fotoelektrona znanstvenici su mogli izračunati brzinu zagrijavanja okolnih elektrona. Temperatura elektrona je zatim mogla biti izračunata tako da se brzina zagrijavanja elektrona uravnoteži s brzinom hlađenja elektrona do kojeg dolazi kada energija elektrona prelazi na ione i neutralan plin čije se koncentracije također mogu izmjeriti. Dakle, očekivalo se da će ovaj program pružiti puno novih informacija o globalnoj strukturi i dinamici neutralne atmosfere jer su se parametri mogli mjeriti na mnogo dubljim razinama unutar termosfere nego što je ranije bilo moguće [8].

2.5.1. Energetika termosfere

Energetika termosfere je složena i dinamična, uključuje sve izvore i procese koji pridonose energetske balansu ovog sloja Zemljine atmosfere te ovisi o solarnoj aktivnosti i geomagnetskim fenomenima. Proučavanje ovih procesa može pridonijeti boljim analizama svemirskog vremena i njegovih utjecaja na tehnologiju i komunikacijske sustave.

Mnogo stotina spektara niske energije tokova elektrona izmjereno je tijekom spomenutog istraživačkog programa „The Atmosphere Explorer“. Spektri promatrani u dnevnoj termosferi imali su dobro podudaranje s teorijskim očekivanjima. Vrhovi tokova uočeni na niskim nadmorskim visinama lako su se identificirali kao rezultat jake fotoionizacije Sunčevim zračenjem. Instrumentima su prikupljeni važni podaci u polarnim regijama, uključujući prvo preslikavanje elektrona niske energije u polarne vrhove na malim nadmorskim visinama. Elektroni proizvedeni fotoionizacijom imaju jedinstven energetske spektar i uočeno je da se talože u noćnoj ionosferi. S obzirom na to da oni ne mogu nastati u nedostatku Sunčevog ultraljubičastog zračenja, to taloženje je ukazivalo kako se takvi elektroni mogu transportirati iz Suncem obasjane hemisfere u onu u tami [8].

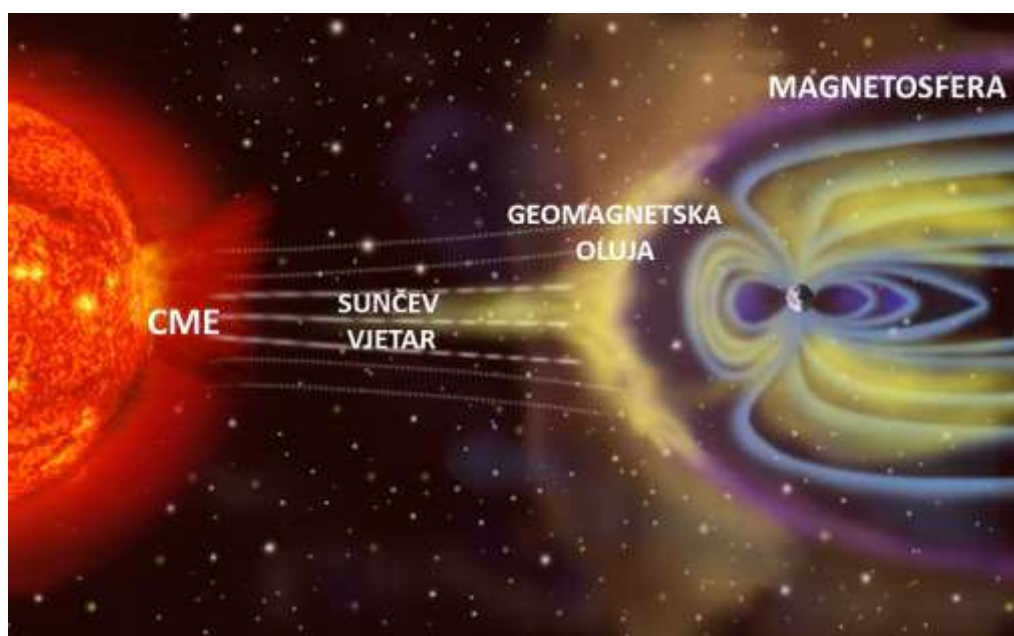
2.6. SUNCE I SUNČEV VJETAR

Sunce je zvijezda u središtu solarnog sustava u kojemu se nalazi Zemlja. Njegova gravitacija drži cijeli Sunčev sustav na okupu. Veze i interakcije između Zemlje i Sunca odgovorne su za godišnja doba, vrijeme, klimu, oceanske struje i aurore [23]. Sunce je žuta patuljasta zvijezda koja je stara oko 4,5 milijardi godina i opisuje se kao vruća, sjajna kugla vodika i helija. Građena se od jako vruće, električki nabijene plazme. Temperatura Sunčeve jezgre iznosi oko 15 000 000 °C. Udaljeno je oko 150 milijuna kilometara od Zemlje. Otprilike je 100 puta šire od Zemlje i 10 puta šire od Jupitera. Površina Sunca, odnosno dio Sunca koji je vidljiv sa Zemlje se naziva fotosfera. Iznad Sunčeve površine nalazi se njegova tanka kromosfera i ogromna korona („kruna“). Iako su uvjeti takvi da na Suncu nema života, njegova energija je neophodna za život na Zemlji [24].

Sunce ima nekoliko regija. Unutrašnjost podrazumijeva jezgru, zonu zračenja i zonu konvekcije. Nadalje, slijedi fotosfera, zatim kromosfera i prijelazna zona te na kraju korona, odnosno Sunčeva ekspanzivna vanjska atmosfera. Nakon što materijal napusti koronu nadzvučnom brzinom, nastaje solarni vjetar koji formira magnetski „mjehurić“ oko Sunca koji se naziva heliosfera. U jezgri, gdje se vodik stapa u helij, dolazi do nuklearnih reakcije koje pokreću Sunčevu toplinu i svjetlost.

Sunce stvara magnetska polja koja se protežu u svemir i čine međuplanetarno magnetsko polje. Polje se kroz Sunčev sustav nosi pomoću Sunčevog vjetra, odnosno toka električki nabijenog plina koji puše od Sunca prema van u svim smjerovima [24].

Sunce prolazi kroz faze visoke i niske aktivnosti koje čine solarni ciklus. Otprilike svakih 11 godina dolazi do zamijene sjevernog i južnog magnetskog polariteta, a tijekom tog ciklusa Sunčeva fotosfera, kromosfera i korona prelaze iz mirnog stanja u stanje nasilne aktivnosti. Visina ciklusa aktivnosti Sunca naziva se solarni maksimum i obilježava period znatno povećane aktivnosti solarne oluje. Sunčeve pjege, odnosno izbacivanje koronalne mase (eng. *Coronal Mass Ejection*, CME) su također karakteristične za razdoblje solarnog maksimuma. Tijekom CME izbacuje se do nekoliko milijardi tona plazme i magnetskog polja u Sunčev sustav. Sunčeva aktivnost može osloboditi ogromne količine energije i čestica koje mogu utjecati na život na Zemlji [24].



Slika 7. Utjecaj CME i Sunčevog vjetra na Zemlju. Slika prilagođena prema izvoru [36]

Sunčev vjetar utječe na Zemljinu magnetosferu (Slika 7) i on je pokretač nastanka polarne svjetlosti koja je uobičajeno vidljiva na lokacijama blizu sjevernog i južnog pola Zemlje. S druge strane, u nekim slučajevima solarni vjetar može i pokrenuti svemirske vremenske oluje koje ometaju satelite u svemiru, brodske komunikacije na oceanima ili električne mreže na kopnu [25].

Kao što je već spomenuto, Sunčevo ultraljubičasto (UV) i ekstremno ultraljubičasto (EUV) zračenje ima veliki utjecaj na termosferu. Učinak koji pokreće vjetrove u termosferi je upravo dnevna varijacija u apsorpciji solarnog EUV i UV zračenja koje zagrijava i širi dnevnu termosferu pri čemu dolazi do stvaranja horizontalnih gradijenata tlaka iz dana u noć. U tanjoj gornjoj atmosferi (iznad 200 km nadmorske visine) je raspodjela Sunčevog grijanja ujednačena tijekom dana, a na nižim udaljenostima od Zemljine površine Sunčevo grijanje varira. Sunčevo EUV zračenje također ionizira komponente u termosferi i stvara ionosferu. Za razliku od niže ionosfere, u višoj ionosferi su kemijske vremenske konstante duže i fotokemijska ravnoteža odustaje od složenih transportnih procesa koji su nekim dijelom vođeni neutralnim vjetrovima termosfere i električnim poljima [26].

2.7. GEOMAGNETSKE OLUJE

Geomagnetska ili solarna oluja uzrokovana je udarnim valom koji prodire kroz Sunčev vjetar, odnosno dolazi do sudaranja solarnih čestica sa Zemljinim magnetskim poljem (Slika 7). To je takozvani privremeni poremećaj koji je za vrijeme maksimalne Sunčeve aktivnosti puno učestaliji, a većina ih je uzrokovana koronalnim izbačajima mase. S druge strane, za vrijeme minimalne Sunčeve aktivnosti, uzrokovan je mlazom čestica Sunčevog vjetra velike brzine. Geomagnetske oluje uzrokuju neke od poremećaja vezanih za ionosferu pri čemu može doći do ometanja radio valova i kompasa, a odgovorne su i za spuštanje polarne svjetlosti na niže geografske širine. Najveća geomagnetska oluja zabilježena u povijesti dogodila se 1859. godine [19].

NOAA (eng. *National Oceanic and Atmospheric Administration*) kategorizira geomagnetske oluje na ljestvici od G1 do G5, gdje oluje G5 označava najekstremniju oluju koja može rezultirati potpunim nestankom radiovalova visoke frekvencije na strani Zemlje koja je obasjana Suncem [27].

2.8. POLARNA SVJETLOST

Aurora ili polarna svjetlost je optički fenomen kojeg karakteriziraju velike raznolikosti, od boje i oblika sve do kretanja koje nekada može biti iznimno sporo, a nekada vrlo brzo [30].

Polarna svjetlost označava šareni prikaz svjetlosti koji se obično vidi noću na sjevernoj, odnosno južnoj hemisferi. Polarna svjetlost na južnoj hemisferi poznata je i kao južna svjetlost (eng. *aurora*

australis), a ona na sjevernoj hemisferi naziva se i sjeverna svjetlost (eng. *aurora borealis*). Ova svjetlost nastaje kada Sunce izbacuje nabijene čestice, odnosno elektrone i protone tijekom Sunčevog (solarnog) vjetera. Zemljino magnetsko polje tvori nevidljivi štit koji preusmjerava taj solarni vjetar oko Zemlje. Zbog toga se linije magnetskog polja povlače i rastežu te se onda vraćaju poput elastične trake i lansiraju nabijene čestice dolje prema površini Zemlje duž linija magnetskog polja (Slika 7). Kada se lansirane čestice sudare s plinovima u višim dijelovima Zemljine atmosfere, nastaje polarna svjetlost. Sudari nabijenih elektrona i protona s plinovima proizvode male bljeskove koji se na nebu vide u obliku polarne svjetlosti. S obzirom na to da se milijarde bljeskova pojavljuje u nizu, stječe se dojam kretanja polarne svjetlosti nebom. Dio svemira gdje se odvija većina radnji koje prethode nastanku polarne svjetlosti, povezan je sa sjevernim i južnim polovima Zemlje, a zbog oblika Zemljinog magnetskog polja, linije magnetskog polja stvaraju dva ovala aurore oko sjevernog i južnog pola. Aurore se najčešće pojavljuju oko proljetnog i jesenskog ekvinocija¹⁹, a vidljivije su zimi nego ljeti jer je zimsko noćno nebo tamnije [29].

2.8.1. Boje polarne svjetlosti

Polarna svjetlost, prikazana na slici 8, najčešće se pojavljuje u blijedo zelenoj boji (optička valna duljina 557.7 nm). Do nastanka aurore te boje dolazi zbog emisije atomskog kisika na otprilike 100 km udaljenosti od Zemljine površine. Tijekom posebno intenzivne auroralne aktivnosti moguća je i pojava jarko crvene aurore, ali je ta pojava jako rijetka. Ta crvena boja potječe iz emisije atomskog kisika koji se nalazi u višim dijelovima atmosfere koji emitira zelenu svjetlost. S druge strane, crvena aurora, uzrokovana je emisijom molekuskog dušika i vidljiva je u obliku ružičasto-crvene rese na dnu zelenog luka aurore kao što je i prikazano na slici 9 [30].

¹⁹ Trenutak kada Sunce prelazi Zemljin ekvator, odnosno pojavljuje se točno iznad ekvatora, a ne sjeverno ili južno od ekvatora.



Slika 8. Najčešća boja polarne svjetlosti [32]

Polarna svjetlost pojavljuje se na lokacijama srednje geografske širine. Na sjevernoj hemisferi, najčešće je vidljiva u središnjoj Aljasci, Kanadi i sjevernoj Europi [30]. Između 65° i 72° sjeverno (paralelno) oko Zemlje, postoji područje koje se naziva „pojas sjevernog svjetla“ (eng. *Northern Lights belt*) koje ima visoku auroralnu frekvenciju i intenzitet. Unutar tog pojasa nalazi se sjever Islanda i jedno je od glavnih mjesta promatranja aurora [32].



Slika 9. Polarna svjetlost [31]

2.8.2. Negativna strana polarne svjetlosti

Isti elektromagnetski procesi koji su odgovorni za nastanak polarne svjetlosti mogu predstavljati i probleme za razne aktivnosti poput radiokomunikacije ili prijenosa električne energije. Nabijene čestice koje uzrokuju obojenje polarne svjetlosti mogu mijenjati ionosferu što može dovesti do spomenutih problema. Visokofrekventne radiokomunikacije mogu iskoristiti reflektivnost ionosfere za odbijanje radiovalova na udaljenosti koje su puno veće od dopuštenih, no prije komunikacijskih satelita to je bila primarna metoda komunikacije na velike udaljenosti. Osim toga, solarni poremećaji koji uzrokuju aureore, mogu uvelike povećati gustoću iona u donjoj ionosferi što može dovesti do apsorpcije radiovalova prije no što se oni mogu reflektirati. Također, ti procesi mogu i generirati niskofrekventne radiovalove koje ionosfera reflektira natrag u svemir stvarajući intenzivan radio signal koji bi se mogao otkriti na velikim udaljenostima. Još jedan problem koji se događa vezan je za sustav električne energije pri fluktuaciji²⁰ geomagnetskog polja povezanog s polarnom svjetlosti. Naime, električno polje stvara vremenski promjenjivo magnetsko polje i zbog toga fluktuacija u geomagnetskom polju može potaknuti strujanje električne struje u bilo kojim električki vodljivim sustavima koji su uzemljeni na različitim mjestima, poput dalekovoda i slično [30].

²⁰ Promjena ili proces mijenjanja, posebno kontinuirano između jedne razine ili jedne i druge stvari.

3. ZAKLJUČAK

Unatoč tome da je danas dosta toga poznato o termosferi, ona i dalje pruža mogućnost otkrivanja novih spoznaja koje privlače pozornost znanstvenika. S obzirom na uvjete u ovom atmosferskom sloju, uloženo je puno truda i napora za sami početak istraživanja jednog od najvećih slojeva Zemljine atmosfere. Termosfera predstavlja gornji dio atmosfere i u njoj vladaju specifični uvjeti poput izrazito visokih temperatura te jako rijedak zrak što omogućuje zadržavanje iona u ovom sloju prije njihove reakcije s neutralnim vrstama. Iako se prostire između 80-90 km nadmorske visine i 500-1000 km iznad površine Zemlje, termosfera uvelike pridonosi životu na Zemlji. Primjerice, svo zračenje koje ulazi u okoliš i koje utječe na živi svijet, mora prvo proći kroz termosferu prije nego dođe u niže slojeve atmosfere, a svi izbalansirani procesi koji se odvijaju u ovom atmosferskom sloju, određuju koje zračenje ne može ući u te niže slojeve atmosfere. Čestice koje su prisutne u termosferi dolaze iz raznih izvora. Solarne čestice, koje dolaze iz Sunčevog vjetra, mogu se grupirati i biti izvor polarne svjetlosti. Najzastupljenije vrste u ovom sloju su molekularni kisik i dušik, atomski kisik, a u višim slojevima termosfere također i helij i vodik. Polarna svjetlost je posljedica izbačaja nabijenih elektrona i protona od strane Sunca koje Zemljino magnetsko polje preusmjerava oko Zemlje. Kada se te nabijene čestice sudare s plinovima prisutnim u termosferi, nastane polarna svjetlost. Osim aurora, termosfera je poznata još i po tome što se u njoj nalazi Međunarodna svemirska postaja. Termosfera se i dalje istražuje, a osim pojava koje se u njoj događaju i svih procesa koji prethode tim pojavama, istražuje se i utjecaj ljudi i Sunca na ovo najmanje shvaćeno područje između Zemlje i svemira. Istraživanja termosfere mogu se primijeniti za računalne modele i simulacije u svrhu predviđanja ponašanja prisutnih kemijskih vrsta, odnosno klimatskih promjena.

4. POPIS LITERATURE

1. A.G. Burns, T.L. Killeen, Polar Thermosphere, Editor(s): James R. Holton, Encyclopedia of Atmospheric Sciences, Academic Press, **2003**, 1768-1777.
2. J. H. Seinfeld, S. N. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, **2006**.
3. W. Qian, A Physical Explanation for the Formation of Auroras, *Journal of Modern Physics*, **2023**, 14, 271-286
4. Crometeo. <https://www.crometeo.hr/atmosfera/> (04.05.2024.)
5. Center for Science Education.
<https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/troposphere> (4.4.2024.)
6. ABC Geografija. <https://abcgeografija.com teme/atmosfera/> (18.3.2024.)
7. T.L. Killeen, A.G. Burns, I. Azeem, S. Cochran, R.G. Roble, A theoretical analysis of the energy budget in the lower thermosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **1997**, 59 (6) 675-689.
8. E. Burgess, D. Torr, Into the thermosphere: The Atmosphere Explorers, AE Investigators, Washington DC, **1987**, 3-22, 55-83, 119-136.
9. Definition and delimitation of outer space: Additional contributions received from States members of the Committee, 28 March-8 April **2022**.
https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2022/aac_105c_22022crp/aac_105c_22022crp_24_0_html/AAC105_C2_2022_CRP24E.pdf (4.4.2024.)
10. M. Sinnhuber, H. Nieder, N. Wieters, Energetic Particle Precipitation and the Chemistry of the Mesosphere/Lower Thermosphere. *Surv Geophys* **2012**, 33, 1281-1334.
11. Meteorologijaenred.
<https://www.meteorologijaenred.com/hr/ionosfera.html> (22.07.2024.)
12. J. C. McDowell, The edge of space: Revisiting the Karman Line. *Acta Astronaut.* **2018**, 151, 668-677.
13. S.C. Solomon, R.G. Roble, Thermosphere, Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition), Academic Press, **2015**, 402-408
14. NASA. <https://www.nasa.gov/image-article/earths-upper-atmosphere/> (04.05.2024.)
15. Center for Science Education.
<https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/thermosphere> (04.05.2024.)
16. M. Kelley, The Earth's Ionosphere, vol. 96. Academic Press, San Diego, USA, 2009
17. Encyclopaedia Britannica. <https://cdn.britannica.com/46/109746-050-9511BBEF/differences-layers-ionosphere-Earth.jpg> (21.07.2024.)
18. S.E. Manahan. Fundamentals of Environmental Chemistry. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press LLC, **2001**. 993 .
19. D. Sierra-Porta, A multifractal approach to understanding Forbush Decrease events: Correlations with geomagnetic storms and space weather phenomena, *Chaos, Solitons & Fractals*, **2024**, 185, 115089
20. T. E. Sarris, Understanding the ionosphere thermosphere response to solar and magnetospheric drivers: status, challenges and open issues, *Phil. Trans. R. Soc.*, **2019**, A 377: 20180101
21. D. G. Torr, M. R. Torr, Chemistry of the thermosphere and ionosphere, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **1979**, 41 (7-8) 797-839.

22. K. Venkataramani, J.D. Yonker, S.M. Bailey, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **2016**, *121*, 2450-2461
23. NASA. <https://science.nasa.gov/sun/> (07.05.2024.)
24. NASA. <https://science.nasa.gov/sun/facts/> (07.05.2024.)
25. NASA. <https://science.nasa.gov/science-research/planetary-science/effects-of-the-solar-wind/> (07.05.2024.)
26. J.L. Fox, CHEMISTRY OF THE ATMOSPHERE | Ion Chemistry, Editor(s): James R. Holton, *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, Academic Press, **2003**, 359-375.
27. National Environmental Satellite, Data, and Information Service. <https://www.nesdis.noaa.gov/news/noaa-satellites-detect-severe-solar-storm> (07.05.2024.)
28. Gunter's Space Page. https://space.skyrocket.de/doc_sdat/explorer_ae-c.htm (07.05.2024.)
29. Government of Canada. <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/astronomy/northern-lights/what-are-northern-lights.asp> (07.05.2024.)
30. J. A. Shaw. What We See in the Aurora, 1999. https://www.montana.edu/jshaw/documents/aurora_OPN1999OSA.pdf (08.05.2024.)
31. Nordic Point. <https://nordicpoint.net/island/prirodne-ljepote/polarna-svjetlost/> (08.05.2024.)
32. IcelandTours. <https://www.icelandtours.is/blog/northern-lights-aurora-borealis-iceland/> (08.05.2024.)
33. G. Lu, A.D. Richmond, B. A. Emery, and R. G. Roble, Magnetosphere-ionosphere-thermosphere coupling: Effect of neutral winds on energy transfer and field-aligned current. *Journal of Geophysical Research*, **1995**, *100*, 19.643-19.659
34. T.L. Killeen, Energetics and dynamics of the Earth's thermosphere. *Reviews of Geophysics*, **1987**, *25* (3) 433-454
35. Enciklopedija. https://enciklopedija.cc/wiki/Van_Allenovi_poiasi_zra%C4%8Denja (21.07.2024.)
36. The European Space Agency. https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2007/10/the_sun-earth_connection/9925887-2-eng-GB/The_Sun-Earth_connection.jpg (21.07.2024.)
37. Zimo. <https://zimo.dnevnik.hr/clanak/povecane-emisije-ugljika-smanjuju-zemljinu-atmosferu-a-to-ce-pogorsati-jos-jedan-sve-veci-problem-u-zemljinoj-orbiti---752849.html> (22.07.2024.)