

## **ЗЕМНА АТМОСФЕРА И КОСМИЧЕСКА РАДИАЦИЯ**

### **1. МАГНИТО-ЕЛЕКТРОННА АТМОСФЕРНА СТРУКТУРА**

**Маруся Бъчварова**

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките*  
*e-mail: marusjab@space.bas.bg*

**Ключови думи:** *Висока атмосфера, екзосфера, космическа радиация*

**Резюме:** *В тази работа е направен кратък преглед на магнито-електронната структура на атмосферата и е дискутирана ролята на космическата радиация при нейното формиране. Температурата е основен признак при разделянето на неутралната атмосфера на слоеве. Високата атмосфера (над 80-100 km.) се разделя на области на основата на броя на свободните електрони и йони и в зависимост от тяхното поведение.*

## **EARTH'S ATMOSPHERE AND SPACE RADIATION**

### **1. MAGNETO-ELECTRONIC ATMOSPHERIC STRUCTURE**

**Marusya Buchvarova**

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences*  
*e-mail: marusjab@space.bas.bg*

**Keywords:** *Upper atmosphere, exosphere, space radiation*

**Abstract:** *In this work a brief review of magneto-electronic structure of the atmosphere is given and is discussed the role of cosmic radiation in its formation. The variation in temperature is a key feature in the separation of the neutral atmosphere of layers. The upper atmosphere (over 80-100 km.) is divided into regions based on the number of free electrons and ions and, depending on their behavior.*

#### **Въведение**

Галактичните космични лъчи (ГКЛ) имат важно значение за физиката на земната атмосфера, както и за околоземната среда. Те играят съществена роля за йонизацията на най-ниската част на йоносферния слой *D* под 60-70 km, и също така са основен инициатор на ядрено-електромагнитните взаимодействия под 30 km. в атмосферата. Потокът от вторични заредени частици, генериран от първичните космични лъчи, е единствен източник на положителни и отрицателни йони в земната атмосфера на височини над 2-3 km. [1]. ГКЛ определят химията и електричните параметри в атмосферата. Те създават озоносферата и влияят активно върху химичните реакции на атмосферните съставлящи с азота  $O_3$  [2]. Под 3 km. основен принос за йонизацията има естествената радиоактивност. Космичните лъчи (КЛ) създават космогенните ядра в космоса, атмосферата, хидросферата и литосферата като  $^{10}Be$ ,  $^7Be$ ,  $^3He$  and  $^3H$ .

Всичко изброено по-горе е доказателство за огромното значение на космичните лъчи за процесите на слънчево-земните връзки и слънчево-земната физика. Тук, в първата част на работата, касаеща земната атмосфера и влиянието на космическата радиация върху отделните ѝ области и слоеве, ще направим кратък преглед на магнито-електронната структура на атмосферата, спирайки се на основните черти на йоносферата, магнитосферата и екзосферата.

## Земна атмосфера: общ преглед

Радиацията, която идва до нас от космическото пространство бива: електромагнитна (със слънчев произход) и корпускулярна (със слънчев и галактичен произход).

Почти цялата лъчиста енергия от Слънцето, вземаща участие в радиационния баланс на Земята, лежи между  $0.01 \mu\text{m}$  и  $4 \mu\text{m}$  от електромагния спектър. Този интервал покрива ултравиолетовата област, видимата светлина и инфрачервената област [3]. Рентгенови лъчи, микровълните и радиовълните имат съвсем малък принос към общата лъчиста енергия. В Таблица 1 са дадени спектралните области от електромагнитния спектър на Слънцето. Тази Таблица се нуждае от някои разяснения. В астрофизиката и космическата физика меките рентгенови лъчи е прието да са между  $0.1 \text{ nm}$  и  $10 \text{ nm}$ . Границите между инфрачервената област, микровълните и радиовълните са условни и в различните области се приемат различно.

Видимата светлина и инфрачервената област имат най-голям принос към общата радиативна енергия, докато ултравиолетовата област съдържа  $\sim 7$  до  $9\%$  от нея [4]. Радиовълните и X-rays имат много малък принос към пълната радиативна енергия. Въпреки, че потоците от частици (слънчев вятър и коронарно изхвърляне на маса - CME) оказват огромно влияние върху йоносферата и магнитосферата, загубата на енергия и на частици от атмосферата, предизвикана от тези събития е много малка [4, 5].

Таблица 1. Спектрални области на слънчевото лъчение [4]

Радиовълни	$\lambda > 1 \text{ mm}$
Далечна инфрачервена област	$10\mu\text{m} < \lambda < 1 \text{ mm}$
Инфрачервена област	$0.75\mu\text{m} < \lambda < 10 \mu\text{m}$
Видима светлина	$0.4 \mu\text{m} < \lambda < 0.75 \mu\text{m}$
Ултравиолет (UV)	$0.12 \mu\text{m} < \lambda < 0.4 \mu\text{m}$
Екстремн ултравиолет (EUV)	$0.01 \mu\text{m} < \lambda < 0.12 \mu\text{m}$
Меки X-rays	$0.1 \text{ nm} < \lambda < 10 \text{ nm}$
Твърди X-rays	$\lambda < 0.1 \text{ nm}$

Над тропосферата слънчевата радиация с дължина на вълната  $< 0.3 \mu\text{m}$  (близък ултравиолет и X-rays) се абсорбира напълно [6, 7], между  $0.15 \mu\text{m}$  и  $0.31 \mu\text{m}$  се абсорбира от стратосферата и мезосферата [6, 8], докато под  $0.12 - 0.16 \mu\text{m}$  се абсорбира основно над  $100 \text{ km}$ . [6, 8]. Обаче, над  $100 \text{ km}$ . абсорбираната енергия е пренебрежимо малка част от пълната радиативна енергия [6]. Schunk and Nagy [4, 5] дават, че EUV радиация достига до около  $0.1\%$  от общата слънчева лъчиста енергия. Въпреки тази изключително ниска стойност, фотойонизацията на неутралните молекули от слънчевия EUV и меката X-ray радиация е основната причина за образуването на плазма в йоносферата [4]. Освен споменатите основни източници, йонизацията на атмосферата може да се дължи също на метеорити (в слоя E) или на корпускулярна радиация, галактична и слънчева, в слоя D.

Атмосферата е газовата обвивка на Земята. Тя е най-плътна в ниските си слоеве, докато с височината нейната плътност намалява. Само за сведение ще отбележа, че общата маса на атмосферата е около  $5-10$  тона. Половината от нея се намира в първите  $5 \text{ km}$ .,  $75\%$  е до  $10 \text{ km}$ .,  $95\%$  - до  $20 \text{ km}$ ., а на височина до  $30 \text{ km}$ . се съдържа около  $99\%$  от масата на атмосферата.

Над  $35 \text{ km}$ . атмосферната маса е не повече от  $1\%$ . Мезосферата и термосферата съдържат само около  $0.1\%$  от общата маса [9].

Близо до повърхността на Земята въздухът се състои от  $\sim 78\% \text{ N}_2$ ,  $21\% \text{ O}_2$ ,  $0.9\% \text{ Ar}$ ,  $0.1\% \text{ CO}_2$  и следи от други съставлящи [10]. До  $100 \text{ km}$ . пропорционалното съотношение между **основните газове** ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Ar}$ ) не се мени с височината и съставът на въздуха е постоянен. Така, в първите  $80 \text{ km}$ ., които съдържат почти цялата маса на атмосферата, въздухът е добре размесен и представлява хомогенна смес. Затова областта под  $100 \text{ km}$ . се нарича хомосфера или турбосфера. Името турбосфера е свързано с това, че турбуленцията предизвиква размесване на атмосферните съставлящи [11]. Около  $100 \text{ km}$ . се наблюдават едновременно два конкурентни процеса с еднаква важност: смесването на атмосферните съставлящи е контролирано и от молекулярна дифузия [12]. Областта на преход от турбулентно смесване към молекулярна дифузия се нарича турбопауза. Над турбопаузата атмосферните съставки не са добре премесени и тази област се нарича хетеросфера [12]. В нея съставът на въздуха търпи промени, а пропорционалното съотношение между постоянните компоненти се мени с височината. В хетеросферата (над  $100 \text{ km}$ .) се наблюдава дисоциация на молекулите и движенията им стават по-независими [11].

Макар, че съставът на атмосферата под 100 km. е относително еднороден, още над около 25 km. под влияние на слънчевата ултравиолетова радиация започва дисоциация на молекулите кислород и азот, което води до образуването на озон  $O_3$  в средната атмосфера. Важна неутрална компонента на мезосферата е  $NO$ . Тя, както и  $O_3$  са второстепенни съставки и имат фотохимичен произход [13]. Във високите части на атмосферата ( $> 80$  km.) под влияние на слънчевия ултравиолет се образуват атоми и йони [14]. Над около 100 km. фотодисоциацията на доминиращите молекули  $N_2$  и  $O_2$  започва да отнема състава от  $O_2$  и  $N_2$  към  $O$ ,  $O$  и  $N$ ,  $N$  [13]. Все пак, около тази височина молекулният кислород и азот продължават да доминират [15]. Над около 120 km. много от кислорода е в атомна форма. Всъщност, това е ниската част на хетеросферата, която съдържа относително голяма концентрация на атомен кислород, а също така и елементите  $H$ ,  $OH$ ,  $NO$ ,  $O_3$  [12]. Въпреки това под 200 km. неутралният молекулен кислород, азот и аргон са доминиращи съставки [11].

В резултат на дифузията по-тежките атоми и молекули (кислород и азот) показват тенденция да остават в по-ниските слоеве, докато по-леките газове (като водород и хелий) изплуват към високите области на атмосферата. Тежката основна съставляваща, молекулният азот, пада най-бързо с височината. Вследствие влиянието на молекулната маса върху дифузията, над 200 km. се наблюдава забележимо нарастване на относителното изобилие на по-леките съставляващи. Около  $\sim 400 - 500$  km. в атмосферата доминира атомният кислород със следи от молекулен азот. Наблюдава се и нарастване на леките съставляващи, в началото - хелий, а след това и водород [12]. Тъй като азотните молекули се дисоциират по-бързо от кислородните, молекулното тегло намалява и кислородните атоми са доминиращите частици от около 400 km. до  $\sim 1000$  km. [11]. Над 1000 km. атмосферата съдържа основно водород [11], [16].

Така, останалите в хетеросферата газове се разслояват по молекулна маса: по-тежките газове, азот и кислород, остават в ниската хетеросфера, докато леките, като водород и хелий, се простират много по-надалеч [17].

Атмосферата на височина до към 60 km. се състои основно от електрически неутрални молекули или атоми, поради което се нарича неутрална атмосфера. На височина от 80 km. атмосферният газ е толкова разреден, че свободните електрони могат да съществуват за кратък период от време преди да рекомбинират с околните положителни йони. Тази част от атмосферата, която съдържа голям брой свободни електрони се нарича йоносфера. Наличието на заредени частици, състоящи се от свободни електрони и йони, подсказва началото на йоносферната област, в която атмосферата има свойства едновременно и на газ и на плазма.

## Магнито-електронна атмосферна структура

### Йоносфера: основни слоеве и области, йонизираща радиация

Йоносферата включва по-малко от 0.1% от общата маса на планетната атмосфера, въпреки това тя е една изключително значима област. Йоносферата на Земята е разделена на три важни слоя:  $D$ ,  $E$  и  $F$ . Слой  $F$  (започва от височина над 140 km. и се простира до над  $\sim 500-600$  km.) се образува основно от фотойонизацията на неутралните атоми / молекули от *EUV радиация*, а във високи ширини е резултат на изсипването на *заредени частици*. Основните газове, които се йонизират от тези лъчения са  $N_2$ ,  $O_2$ , и  $O$ . Така, че йоните в този слой са  $N_2^+$ ,  $O_2^+$ ,  $O^+$  и  $NO^+$  [18].  $N_2^+$  реагира бързо, при което се получава  $NO^+$ . Наблюдават се и  $N^+$  йони. Електронната плътност в този слой е  $\sim 10^{11} - 10^{12} \text{ m}^{-3}$  [19]. Максимумът на йонизация в слоя  $F$  е на височина  $\sim 250-300$  km. (според някои автори от  $\sim 200$  km. до 400 km.).  $F$  има плътен слой от  $O^+$  йони, като понякога през деня се разделя на два отделни слоя  $F1$  (140-200 km.) и  $F2$  (над 200 km.). Максимумът на електронната плътност във  $F1$  е  $\sim 3 \times 10^{11} \text{ e}^-/\text{m}^3$  на обяд, а във  $F2$  е  $\sim 2 \times 10^{12} \text{ e}^-/\text{m}^3$  през деня и  $\sim 3 \times 10^{11} \text{ e}^-/\text{m}^3$  през нощта [20]. Във  $F1$  основните йони са  $NO^+$  и  $O_2^+$ , срещат се и  $O^+$  и  $N^+$  йони. Той се наблюдава само през деня [21]. Основният носител на заряд във  $F2$  е  $O^+$ , наблюдават се също  $H^+$  и  $He^+$  йони [13, 21]. Йонната плътност във  $F2$  областта ( $10^6 \text{ cm}^{-3}$ ) е приблизително с фактор около 10 по-голяма от тази в слоя  $E$ , като неутралната плътност ( $10^8 \text{ cm}^{-3}$ ) е все още с два порядъка по-голяма от йонната плътност [4].

Областта  $E$  (90-150 km) се образува от *слънчево рентгеново (1-10 nm) лъчение* и *EUV* ( $\sim 100-150 \text{ nm}$ ), които йонизират молекулния азот и кислород, дисоциирайки ги до  $N_2^+$  и  $O_2^+$ .  $N_2^+$  изчезва бързо чрез обмен на заряд. В тази област  $NO^+$  е доминиращ положителен йон, въпреки, че има само следи от неутралната молекула  $NO$  [13]. Така, основните йони в този слой са  $O_2^+$  и  $NO^+$ , като се наблюдават и малки количества  $N_2^+$  и  $O^+$  [21]. Електронната концентрация на слоя  $E$  се мени в зависимост от ъгъла, под който падат слънчевите лъчи върху йоносферата. Следователно дневният максимум на електронната концентрация в този слой е

на обяд, а сезонният през лятото. Максимумът на електронната плътност в слоя е  $\sim 10^{11} \text{ e}^-/\text{m}^3$  през деня, докато през нощта той достига около  $3 \times 10^9 \text{ e}^-/\text{m}^3$ . Е има максимум на електронната плътност на височина  $\sim 110\text{-}120 \text{ km}$  [21, 22]. Слой Е започва да изчезва при здрачаване поради липса на инцидентна радиация от Слънцето и рекомбинацията започва да взема превес. Въпреки това през нощта, при спокойни условия, в този слой остава някаква остатъчна радиация и той е отслабен. Това отслабване е причина за нарастване на височината на максималната електронна концентрация, тъй като рекомбинацията протича по-бързо в по-ниските части.

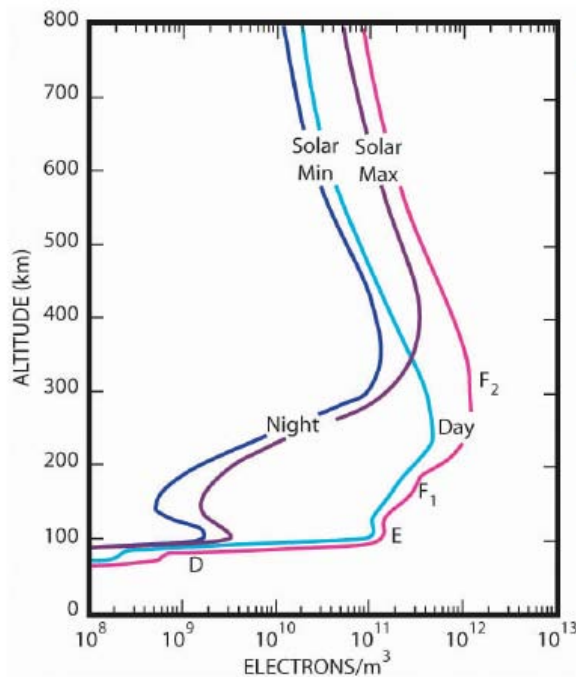
В слоя Е понякога се наблюдава локално повишаване и нееднородности в електронната плътност, известни като спорадичен слой Е [18]. Спорадичните Е-събития могат да продължат от няколко минути до няколко часа [23]. Причините за образуването на такъв слой могат да бъдат най-разнообразни. В средни ширини образуването му се дължи основно на метални йони от метеоритен произход.

Нощният слой и спорадичният слой Е дължат образуването си на електронни и метеоритни атаки [24].

Формирането на слоя D е резултат от следните източници на йонизация: (1) слънчева Lyman-alpha ( $121.5 \text{ nm}$ ), йонизираща малката съставна част NO, (2) слънчеви рентгенови лъчи ( $0.1 - 1 \text{ nm}$ ) йонизиращи  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$ , (3) *слънчеви и галактични космични лъчи*, йонизиращи всички атмосферни съставлящи и (4) фотойонизация на метастабилен  $\text{O}_2$  от слънчево UV лъчение ( $\lambda < 111.8 \text{ nm}$ ) [ 18, 25; 26]. Йоните  $\text{O}_2^+$  и  $\text{NO}^+$ , създадени при тези процеси се конвертират в сложни молекулни съединения  $\text{H}_3\text{O}^+$  ( $\text{H}_2\text{O}$ )<sub>n</sub> [4; 18]. Този слой се наблюдава на височина между 50 и 90 km. с подслой, наречен космически слой С (с максимум на йонизация при  $\sim 55 \text{ km.}$ ) [22, 27]. Космическият слой С е разположен на височина под около 70 km. и е образуван основно от космични лъчи [21, 28].

Йонизацията в този слой е слаба и варира най-често между  $10^8 - 10^{10} \text{ e}^-/\text{m}^3$  [19, 20]. Електронната концентрация, обаче, се изменя в зависимост от слънчевия цикъл, сезона или денонощието [21].

При спокойни условия слой D съществува само през деня, през нощта изчезва, тъй като рекомбинацията е по-силна от йонизацията [29, 30]. Въпреки това, обаче, той може да бъде създаден по всяко време на деня или нощта от високоенергетични заредени слънчеви частици, свързани с геомагнитните смущения. Ракетните и сателитни наблюдения показват, че слънчевите космични лъчи, слънчевите протони с енергия от 1 до 100 MeV и вероятно слънчевите електрони с енергия над 10 keV, са вероятни източници на йонизация в този слой [21].



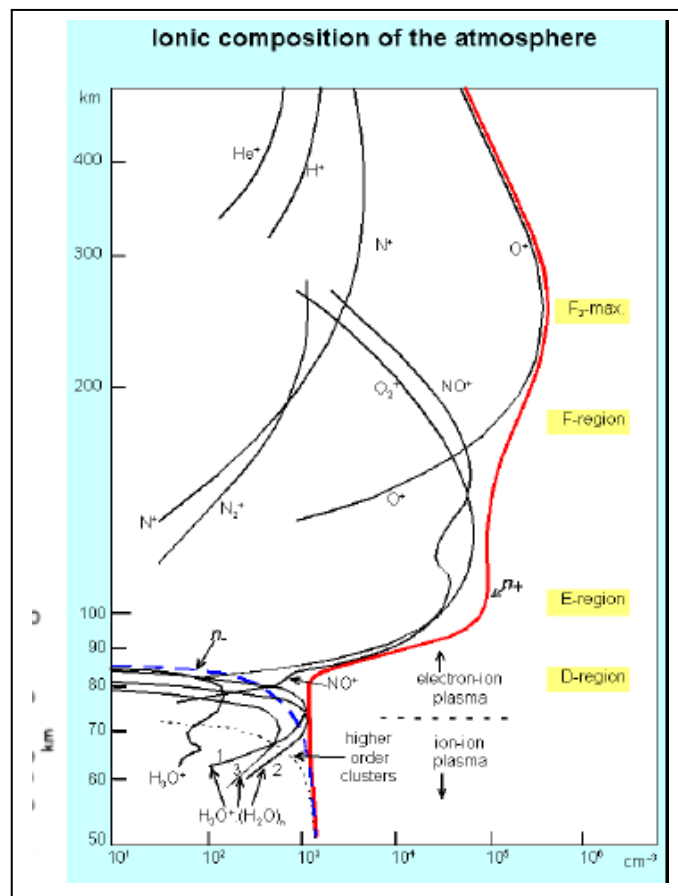
Фиг. 1. Характерни дневни и нощни профили на електронната плътност в йоносферата за слънчев минимум и слънчев максимум. Фигурата е от Anita Aikio [19]

Под 70 km. доминираща е йонизацията от високоенергетични космични лъчи (слънчеви и галактични) [27, 31, 32]. През нощта ГКЛ създават остатъчна радиация. Най-ниската част на слоя *D* се дължи на йонизация от ГКЛ с енергии над 1 GeV [31].

Слоят *D* е най-ниската част на йоносферата. В него под 85 km. в атмосферната химия и състав доминират йонни клъстери (като  $(\text{NO})^+(\text{H}_2\text{O})_n$ ,  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ ,  $\text{O}_2^+(\text{H}_2\text{O})_n$  [33], а също така и положителни и отрицателни йони (например  $\text{O}_2^-$ ) [19]. Над 85 km. йонните клъстери отстъпват мястото си на доминантни йони на молекулните йони от слоя *E*:  $\text{O}_2^+$  и  $\text{NO}^+$  [33, 34 35].

На фиг. 1 са показани дневните и нощни профили на електронната плътност в йоносферата за слънчев минимум и слънчев максимум, а на фиг. 2 – йонен състав в отделните йоносферни слоеве.

Областта над *F2*, където електронната плътност започва да намалява бавно с височината, достигайки до плазмосферата, се нарича висока йоносфера (*topside ionosphere*). На средни ширини високата йоносфера се простира от 500-600 km. до 1500 km., но в повечето случаи тази област е под ~ 1 000 km. В нея през деня под преходната област (където концентрациите на  $\text{O}^+$  и  $\text{H}^+$  са изравнени) доминират се йоните на атомния кислород  $\text{O}^+$  [4, 41, 42, 43].



Фиг. 2. Йонен състав на атмосферата. Графиката е от J. Papon, M. Cohen, B. Cotts, and N. Haque [20]

Много изследователи подчертават факта, че йоносферата е вградена в неутралната атмосфера. Дори в максимума на слоя *F* с електронна плътност е  $10^{12} \text{ m}^{-3}$ , неутралната атмосфера е с плътност  $\sim 3 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ . В по-ниските части, в областта на *D* и *E* слоя, плътността на неутралите смазва електронната плътност, достигайки 10 порядъка над нея [36]. Плътността на неутралите е  $\sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$  при 60 km.,  $\sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$  при 100 km. и достига до  $\sim 10^{14} \text{ m}^{-3}$  при  $\sim 400 \text{ km}$  [37]. Степента на йонизация на йоносферната плазма се определя от отношението  $N/N_m$ , където  $N$  е концентрацията на заредените частици (разглеждаме плазмата като квазиуеутрална среда,  $N_e \approx N_i \equiv N$ ), а  $N_m$  е концентрацията на неутралната компонента (неутрални атоми и молекули). Степента на плазмена йонизация в йоносферата расте с височината. Под 100-120 km. степента на плазмена йонизация е минимална ( $N/N_m \sim 10^{-8} - 10^{-6}$ ), за височини около и малко над 300 km.  $N/N_m \sim 10^{-4}$  и около и малко над 1 000 km. степента

на йонизация на плазмата достига 10%. При по-големи височини, над 1 000 km., плазмата е напълно йонизирана,  $N/N_m \geq 1$  [26, 38, 39, 40].

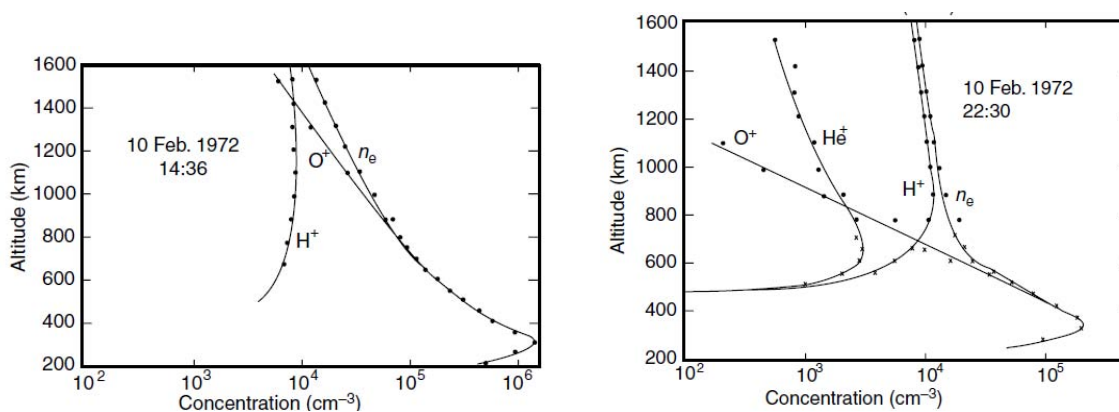
Тук трябва да споменем, че йоносферата не бива да се разглежда като стационарна система от слоеве, тъй като тя е изложена на постоянни промени. Степента на йонизация в нея се мени според сезона, часа на денонощието, промяната на слънчевата активност, географската ширина и т.н. Освен това, преходът между отделните слоеве с различна електронна концентрация става плавно. Въпреки това хипотезата за слоевия строеж на йоносферата е приета навсякъде и битува и до днес, а най-вероятно ще битува и в бъдеще.

Над 600 km. концентрацията на частици силно намалява. Всъщност над тази височина започва влиянието на земното магнитно поле и неговата конфигурация започва да играе съществена роля при определяне поведението на заредените частици

### Плазмосфера и магнитосфера

Над високата йоносфера е разположена плазмосферата. Долната граница на тази област се определя като слой, след който се извършва преход от доминиране на кислородни към доминиране на водородни йони (фиг. 3) [44, 45 46].

Плазмосферата може да се разглежда едновременно като разширение на йоносферата на ниски и средни ширини и като вътрешна част на магнитосфера [48]. Тя се простира на височина от 1 000 – 3 000 km. В нея плазмата е почти напълно йонизирана. В плазмосферата, а също и във високата йоносфера доминират транспортните процеси в плазмата [4].



Фиг. 3. Дневен (ляв панел) и нощен профил (десен панел) на йонния състав във високата йоносфера и протоносфера, измерени в Arecibo, Puerto Rico [4, 47]

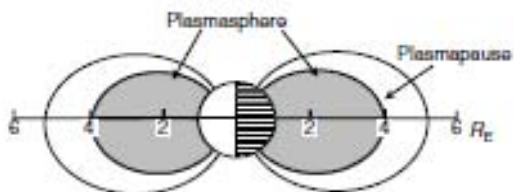
Плазмосферата има формата на тор (фиг. 4). Магнитното поле в нея се описва като диполно, а магнитни силови линии са затворени. Тя е съставена от студена (около 1 eV, най-много до 10 eV) и плътна (десетки до хиляди частици в  $cm^3$ ) плазма, която обгражда Земята при геомагнитни ширини под около  $65^\circ$  [49, 50]. В тази област плазмата е с йоносферен произход и се върти, заедно със Земята. Въртенето на плазмосферата, обаче, е с около 10% по-бавно от това на планетата,  $\sim 27$  h [51]. Доминатният йон в тази област е  $H^+$ , вторият по разпространение е  $He^+$  и много малко съдържание на  $O^+$  [52, 53, 54, 55, 56]. Основния йонен състав често се дава в следното отношение: 77%  $H^+$ , 20%  $He^+$  и 3%  $O^+$  [57].

Плазмосферата може да бъде разделена на две зони: вътрешна и външна. Вътрешната зона е слабо повлияна от геомагнитните смущения, докато външната забележимо варира с магнитните бури и суббури. Въпреки, че магнитните силови линии в тази област остават затворени, възможни са случаи, при които се наблюдава поток на плазмата към външните части на магнитосферата [58]. Външната зона на плазмосферата е по-топла, с температура до приблизително десетки eV [59, 60].

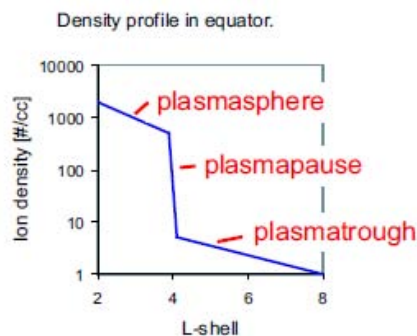
Смята се, че вътрешната област на плазмосферата е в дифузно равновесие [61]. През периоди на по-дълги, относително спокойни геомагнитни условия външната област може да стане дифузна, с постепенно падане на плазмената плътност. С нарастване на магнитната

активност, обаче, тя ерозира и плазмосферните йони се устремяват към външните части на магнитосферата [62].

Външната граница на плазмосферата, т.н. плазмопауза, се определя като област, където плазмената плътност рязко пада с около 1 до 2 порядъка и достига до няколко частици в  $\text{cm}^3$  [60, 63, 64]. Плазмопаузата е границата на въртящата се със Земята плазма. При съвсем спокойни периоди тази граница може да бъде отнесена към въртящата се плазма, докато при активни събития, тя става много динамична в отговор на променящата се среда [65, 66]. Най-често границата на плазмосферата е на около 25 000 - 26 000 km. (~ 4-5 земни радиуса) [67]. Тя може да се простре и до ~ 7 земни радиуса при много спокойни условия. Плазмосферата е по-близо до Земята при геомагнитна активност и при много смутена среда, може да достигне дори до ~3 земни радиуса [63, 67]. На фиг. 4 е дадена схема на плазмосферата и нейната гранична повърхност – плазмопаузата.



Фиг. 4. Схема на плазмосферата с нейната гранична повърхност, наречена плазмопауза [4, 5]

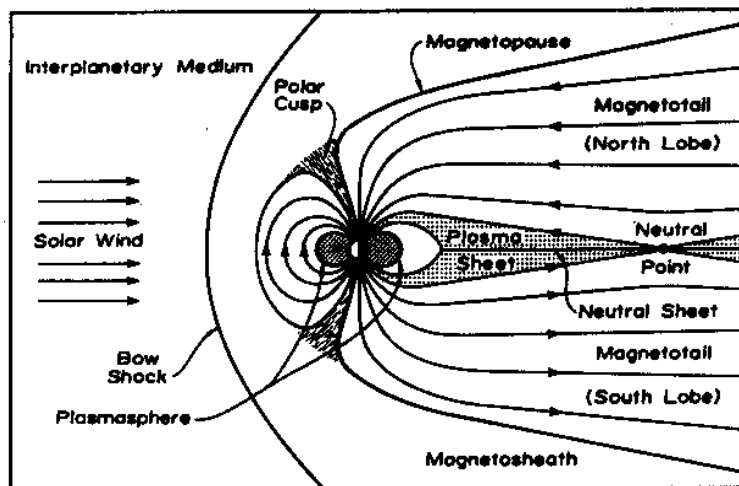


Фиг. 4а. Плазмена плътност над екватора [74]

Плазмопаузата разделя студената и плътна област на земната плазмосфера от външната част на магнитосферата, където плазмата е топла (~100– 1000 eV) и с ниска плътност (над плазмопаузата до няколко частици на  $\text{cm}^3$ , намалявайки към външната ѝ граница) [68, 69]. Над плазмопаузата магнитните силови линии са неспособни да следват движението на Земята, тъй като са повлияни силно от електричните полета, създадени от слънчевия вятър [70]. Плазменото поведение в тази част на магнитосферата се определя основно от индуцираната от слънчевия вятър конвекция [71].

Отвъд плазмопаузата се простира област, наречена "plasma trough" - *eng.* Тук типичните плътности са от порядъка на 1-10 частици на  $\text{cm}^3$  (фиг. 4а) [68, 72, 73].

Наблюденията показват наличието на плазмосферни структури, такива като "notches", "shoulders", "channels", "fingers", "crenulations" (*eng.*), които в момента са обект на активно изучаване. Много често тези структури се простират отвъд плазмопаузата [52, 53].



Фиг. 5. Схема на магнитосферата [80, 81].

Границата между магнитосферата и слънчевия вятър се нарича магнитопауза. Магнитопаузата разделя слънчевото от земното магнитно поле. Определя се като тънък

плазмен слой, където налягането на слънчевия вятър е в равновесие с налягането от магнитосферната плазма [75]. От дневната страна на Земята магнитопаузата се простира до около 10 земни радиуса над повърхността. Когато, обаче, налягането от слънчевия вятър е прекалено силно, дневната страна на магнитопаузата може да бъде компресирана и да достигне разстояние под 6-7 земни радиуса [75]. От нощната страна формата на магнитопаузата е удължена и образувайки дълга магнитна опашка, може да се простре на разстояние до около 1 000 земни радиуса [76].

Между магнитопаузата и плазмопаузата концентрацията на плазмата е  $\leq 1 \text{ cm}^{-3}$  [69, 77, 78, 79]. На фиг. 5 е дадена схема на магнитосферата [80, 81].

Във вътрешната област на магнитосферата, освен плазмосферата, се наблюдават още две основни плазмени популации: кръговите токове и поясите на Ван Алън.

### Радиационни пояси

Радиационните пояси са открити от Ван Алън, американски физик, и неговата група от Университета на Айова. Те носят името на своя откривател [82].

Радиационните пояси са два динамични, тороидални пояса, обграждащи Земята и центрирани около еkvатора, които съдържат високоенергетични заредени частици – предимно протони и електрони, захванати от магнитното поле на планетата [83, 84, 85].

Вътрешният радиационен пояс е по – близо до Земята. Той е центриран на разстояние  $\sim 3\ 000 \text{ km}$ . [84, 86], а се простира средно от  $\sim 1\ 000$  до  $\sim 6\ 000 \text{ km}$ . ( $\sim 0.15$  до  $\sim 1$  земен радиус) [82, 85, 87, 88]. Някои оценяват външната му и вътрешна граница да са съответно при  $\sim 650 \text{ km}$ . и  $\sim 10\ 000 \text{ km}$ . над земната повърхост [89, 90, 91]. Вътрешният радиационен пояс е най-близо до земната повърхост ( до  $\sim 250 \text{ km}$ .) над Атлантическия океан край бразилското крайбрежие (район на т.нар. Южноатлантическа магнитна аномалия) [82, 90, 92, 93]. Този пояс е съставен от частици със слънчев и галактичен произход. Състои се основно от протони с енергия от  $\sim 10$  до  $50 \text{ MeV}$  [84]. Смята се, че протоните с енергия, надхвърлящи  $50 \text{ MeV}$  в по-ниските части при по-малки височини се дължат на бета-разпад на неутрони, създадени при стълкновения на космични лъчи с ядра от високата атмосфера [86]. Поясът съдържа също и електрони с енергии от стотици keV (като е напълно стабилен за MeV електрони [84, 94]); срещат се и електрони с по-ниски енергии [95], нискоенергетични протони [96, 97, 98] и кислородни йони [93, 99] с енергии между 1 и  $100 \text{ keV}$  [90, 91, 99]. За източник на по-нискоенергетичните протони в този пояс се смята дифузията на протони вследствие на промените на магнитното поле при геомагнитни бури [91, 100].

Външният пояс е разположен на разстояние между  $\sim 3$  земни радиуса ( $15\ 000$ - $20\ 000 \text{ km}$ .) и  $\sim 7$ - $10$  земни радиуса ( $40\ 000$ - $60\ 000 \text{ km}$ .) Най-голям интензитет този пояс има на разстояние  $\sim 3$  -  $5$  земни радиуса [82, 84, 85, 89, 90]. Състои се основно от електрони с енергия до  $10 \text{ MeV}$  [82, 90, 93], но също така и от различни йони. Много от йоните са във вид на протони, но определен процент са алфа-частици и  $\text{O}^+$  йони, които постъпват от магнитопаузата в резултат на стълкновения или се опитват да напуснат гравитационното поле на Земята през магнитосферата [84, 90, 91, 93, 101].

И така вътрешният радиационен пояс е съставен основно от протони, а външният от електрони, като вътрешният за разлика от външния не съдържа хелиеви йони. Причината за наличието на хелиеви йони във външния пояс е слънчевия вятър [85, 102]. Интензитетът на вътрешния пояс е най-силен между  $2\ 000$  и  $5\ 000 \text{ km}$  [90].

Смята се, че повечето от частиците в тези пояси са със слънчев произход, а друга част са ГКП [87]. Електроните във външния радиационен пояс се инжектират от геомагнитната опашка вследствие на геомагнитни бури и се енергизират при взаимодействия вълна – частица [82, 91].

Радиационните пояси са динамични области около планетата. Те имат следната структура: стабилна вътрешна зона и силно променлива външна зона [103]. Така, вътрешният пояс е относително стабилен, докато външният е много динамичен [104]. Най-общо казано характерното време на живот на енергетичните протони във вътрешния пояс е  $\sim 10$  години [105]. Броят на космичните йони е относително малък и вътрешният пояс ги акумулира бавно. Обаче, тъй като този пояс е много стабилен (времето на живот на частиците в него достига до 10 години), той се изгражда с години и интензитетите в него са високи [90, 105].

Външният радиационен пояс е по-голям и по-размит от вътрешния. Той може силно да нарасне или да намалее в резултат на геомагнитна буря или на промени в магнитното поле на Земята [106]. Вариациите могат да бъдат едновременно както в радиална посока, така и в населеността на енергетичните частици [91, 93, 107].

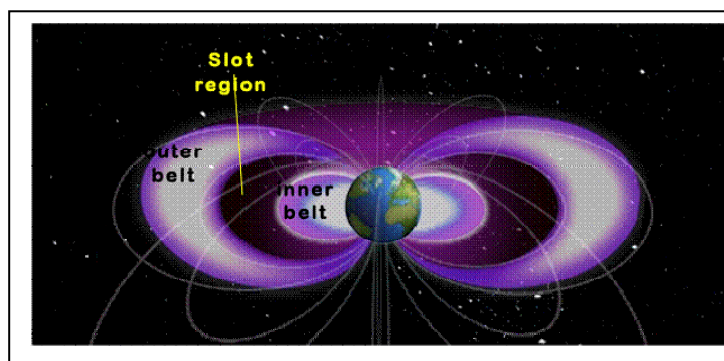


Външният пояс се формира или изчезва в резултат на различни условия в космоса [103], свързани със слънчеви събития и процеси и явления, определящи космическото време [105]. Той се създава чрез инжектиране на енергетични частици вследствие на геомагнитни бури, което го прави много по-динамичен от вътрешния [93].

Външният радиационен пояс проявява забележими вариации във времето в мащаб: часове, дни, седмици или месеци [108]. Потокът електрони във външния пояс може да варира с порядъци през интервали от няколко дни. Тези промени корелират с времето на силни магнитни смущения [85].

Слънчевата активност също оказва влияние на радиационните нива през поясите, т.е. флуктуациите в техния интензитет са частично повлияни и от слънчевия цикъл [83, 90]. Въпреки, че вътрешният пояс е сравнително стабилен, той е подложен на случайни пертурбации вследствие на геомагнитни бури, чиито интензитет варира с 11-годишния слънчев цикъл [109].

Областта между вътрешния и външния пояс в англоезичната литература се нарича „safe zone“, „safe slot“ или „slot region“ [82, 91, 94]. Тази зона обикновено е изпразнена от енергетични електрони, но при силни бури може да бъде попълнена от такъв тип частици [94, 96]. Простира се между ~ 2 до ~ 4 земни радиуса [82, 110].



Фиг. 6. Вътрешен и външен радиационен пояс [111]

Фиг. 6 представя двата радиационни пояса на Ван Алън с областта между тях [111].

Радиационните пояси растат или се свиват, понякога се сливат, а понякога образуват три вместо два пояса [89]. Неотдавна, през 2013 бе съобщено, че е наблюдаван преходен, трети радиационен пояс в продължение на около месец [82].

Ядрените тестове в космоса водят до образуване на изкуствени радиационни пояси [87, 112].

**Геокороната** е луминисцентната част на най-външната област на земната атмосфера-екзосферата [113]. Тя представлява огромен облак от неутрален водород около Земята [114]. Вижда се посредством слънчевия ултравиолет (Lyman-alpha), който се разсейва резонансно от неутралния водород [113, 115].

Магнитосферата е почти напълно йонизирана плазма, в която не се наблюдават стълкновения между частиците. Тъй като ударите са много редки, този неутрален облак може да съществува заедно с плазмата във вътрешните части на магнитосферата с относително слаби смущения [114].

В геокороната освен водород, който е основен елемент, се наблюдават и малко неутрални атоми хелий и кислород. Тази обвивка се простира отвъд 4-5 земни радиуса с намаляваща плътност и достига поне до 15.5 земни радиуса.

Геокороната е част от екзосферата. Долната граница на екзосферата се нарича екзопанза. Над екзопанзата сблъсъците между частиците се наблюдават толкова рядко, че съществува вероятност за атомите, движещи се с достатъчно висока скорост да напуснат земното гравитационно поле и да попаднат в междупланетната среда. В тази област, обаче, има и гравитационно свързана компонента, която включва частици, следващи баллистични траектории, както и „сателитни атоми“, които прекарват известно време на орбита около Земята преди да се върнат в по-плътните слоеве на атмосферата [116].

Екзопанзата за заредените частици е на по-големи височини от тази за неутралите. За полярните области началото на екзосферата за неутралните частици започва от 500 - 600 km. (~1 000 km. за средни ширини), докато плазмената екзопанза е между 1 500 и 3 000 km. [4].

Горната граница на екзосферата се дефинира като разстояние, при което слънчевото радиационно налягане върху атомния водород превишава гравитационното влияние на Земята

[117]. Теоретичната външна граница на екзосферата надхвърля 15.5 земни радиуса (~ 100 000 km.) и достига до ~ 30-31 земни радиуса (около 190 000 km. [30, 116, 117]).

### Заклучение

В тази статия сме засегнали само една малка част от темата, свързана със земната атмосфера и ролята на космическата радиация в отделните ѝ области и слоеве. Тъй като материята, третираща тази тематика, не може да бъде изложена в рамките на един доклад, тя ще бъде представена на отделни части. В първата част сме се постарали да представим основните черти, свързани с магнито-електронната структура на планетната атмосфера. В максимума на йоносферния слой  $F$  само около 1% от неутралната атмосфера е йонизирана [19]. Степента на йонизация след този максимум нараства, като над 600 km. започва влиянието на земното магнитно поле, което расте с височината. Над 1 000 km. атмосферата е напълно йонизирана и в тази област магнитното поле определя напълно структурата на плазмата [36]. При тези височини транспортните процеси на заредените частици са основно под негово влияние.

Йонизиращото действие на слънчевата електромагнитна радиация се наблюдава във всички слоеве на йоносферата и е определящо при формиране на нейната структура. Корпускулярната радиация със слънчев произход има йонизиращо действие в слоя  $D$  на земната йоносфера. Най-ниската част на този слой се образува от йонизация на ГКЛ с енергия над 1 GeV. Тъй като ГКЛ са най-високоенергетични от всички типове корпускулярна радиация, те проникват много дълбоко в земната атмосфера, като предизвикват атмосферни каскади над около 20 km. от повърхността, участват в образуването на космогенни изотопи, а също така оказват влияние и върху атмосферната химия. Във втората част на тази работа ще бъде разгледана ролята на космическата радиация за процесите и явленията в неутралната атмосфера.

### Литература:

1. Stozhkov, Y.I., N.S. Svirzhevsky, V.S. Makhmutov. Cosmic Ray Measurements in the Atmosphere. Workshop on Ion-Aerosol-Cloud Interactions, 18 - 20 Apr 2001, CERN, Geneva, Switzerland, pp.41-62
2. Velinov, P. I. Y. Compt. rend. Acad. bulg. Sci. 53, 2000, pp. 37-40
3. Sokolik, I. N. Radiation balance and solar radiation spectrum, in: Global Ecology (Editor: Sven Erik Jørgensen), pp. 214-215
4. R. Schunk, A. F. Nagy. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. Second Edition, 2009, p. 31, 67.
5. Chappell, C. R. Conference on Magnetospheric-Ionospheric Coupling, Trans. A.G. U. 55, 776, 1974
6. Hansmeier, A. The Sun and Space Weather, 2006
7. Huntten, D.M., J.-C. Gerard, L. M. Francois. The atmosphere's response to solar irradiation, in: The Sun in Time (Editors: C. P. Sonett, M. S. Giampapa, M. S. Matthews), p. 469
8. Committee on Global Change. Solar influences on global change (edited by National Research Council (U.S.)), 1994, p. 50.
9. Vesilind, P., S. M.o.r.g.a.n, L. Helne. Introduction to Environmental Engineering - SI Version. Third Edition, 2010
10. Glossary, <http://www.braeunig.us/space/glossary.htm>
11. Brekke, A. Physics of the Upper Polar Atmosphere. Second Edition, 2013
12. Hobbs, P.V. Introduction to Atmospheric Chemistry, 2000
13. Ghosh, S.N. The Neutral Upper Atmosphere, 2002, pp.10-12
14. Saha, K. The Earth's Atmosphere: Its Physics and Dynamics, 2008
15. Banks, P. M., G. Kockarts, Aeronomy Part A, 1973
16. Sulphery, M. M., M. M. Safeer. Introduction to Environment Management, Third Edition, 2015
17. Chapter 3 - The Atmosphere, [http://myweb.cwpost.liu.edu/vdivener/ers\\_1/chap\\_3.htm](http://myweb.cwpost.liu.edu/vdivener/ers_1/chap_3.htm)
18. Haldler, S. A. et al. D, E, and F Layers in the Daytime at High-latitude Terminator Ionosphere of Mars: Comparison with Earth's Ionosphere Using COSMIC Data, J. Geophys. Res. 114, A03311, doi:10.1029/2008JA013709, 2009
19. Aikio, A. Ionosphere and Radar measurements, 2010, [https://www.eiscat3d.se/drupal/sites/default/files/EISCAT\\_Radar\\_School\\_2012/01\\_McCrea\\_Ionosphere.pdf](https://www.eiscat3d.se/drupal/sites/default/files/EISCAT_Radar_School_2012/01_McCrea_Ionosphere.pdf)
20. Pappon, J., M. Cohen, B. Cottis, N. Haque. Ionospheric Morphology. IHY Workshop on Advancing VLF through the Global AWESOME Network
21. Zolesi, B., L. R. Cander. Ionospheric Prediction and Forecasting. Chapter 2: The General Structure of the Ionosphere, 2014

22. Ionosphere, [http://roma2.rm.ingv.it/en/research\\_areas/4/ionosphere](http://roma2.rm.ingv.it/en/research_areas/4/ionosphere)
23. Ionosphere, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ionosphere>
24. The Earth's ionosphere, <http://utd500.utdallas.edu/ionosphere.htm>
25. Pulinet s, S.A., K. Boy arch uk. Ionospheric Precursors of Earthquakes, 2004, p.18
26. Gurevich, A. V. Nonlinear Phenomena in the Ionosphere, 1978
27. The Ionosphere, Chapter 4,  
<http://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/FYS3610/h04/undervisningsmateriale/Chapter%204-25August.pdf>
28. Ionosphere, <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/D-layer>
29. Ionosphere and magnetosphere. Ionosphere,  
<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/1369043/ionosphere-and-magnetosphere>
30. Atmospheric Structure, <http://www.albany.edu/faculty/rgk/atm101/structur.htm>
31. Bauer, S., H. Lammer. Planetary Aeronomy: Atmosphere Environments in Planetary Systems, 2004, p.19;
32. Weber, W. The Production of Free Electrons in the Ionospheric D Layer by Solar and Galactic Cosmic Rays and the Resultant Absorption of Radio Waves, *J. Geophys. Res.* 67, 1962
33. Johnson, R. M., T. L. Killeen. The Upper Mesosphere and Lower Thermosphere: A Review of Experiment and Theory, p. 39
34. Gordillo-Vázquez, F. J. The ionosphere of the Earth, International Summer School – Workshop “Spectroscopy of the atmospheres (SPECAT 09)”, June 28 – July 10 2009, Jaca, Spain.
35. Banks, P. M., G. Kockarts. Aeronomy, Part 2, p. 126
36. Hawlischka, S. et al. Chapter 1 – Morphology and Dynamics, in: RTO-TR-IST-051 Characterising the Ionosphere (Editor: G Wyman), 2009
37. Chernogor, L. F., N. Blaunstein. Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment, CRC Press Book, 2013
38. Blaunstein, N., E. Plohotniuc. Ionosphere and Applied Aspects of Radio Communication and Radar, 2008
39. Blaunstein, N., C. Chrlstodoulo. Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links, 2007, p. 241
40. Pulinet s, S., K. Boy arch uk. Ionospheric Precursors of Earthquakes, 2004, p.18
41. Garzón, D. P., C. G.M. Brum, E. Echer, N. Aponte, M. P. Sulzer, S. A. González, R. B. Kerr, L. Waldrop. Response of the Topside Ionosphere over Arecibo to a Moderate Geomagnetic Storm. *J. Atm. Solar Terr. Phys.* 73, 2011
42. West, K. H., R. A. Heelis, F. J. R. Ilich. Solar Activity Variations in the Composition of the Low-latitude Topside Ionosphere. *J. Geophys. Res.* 102, 1997
43. Watt, T. M. Ion Distribution and Temperature in the Topside Ionosphere Obtained from the Alouette Satellite. *J. Geophys. Res.* 70, 1965
44. González-Casado, G., J. M. Juan, M. Hernández-Pajares, J. Sanz. Two-component Model of Topside Ionosphere Electron Density Profiles Retrieved from Global Navigation Satellite Systems Radio Occultations. *J. Geophys. Res.* 118, 7348–7359, doi:10.1002/2013JA019099, 2013
45. Sibanda, P., L. A. McKinnell. The Applicability of Existing Topside Ionospheric Models to the South African region. *South African Journal of Science* 105, September/October 2009
46. Shi, X., P. Guo, J. S. Pिंग. Improve the Topside Ionospheric Model Using Cosmic Electron Density Profile Data. *Advances in Geosciences 21: Solar Terrestrial (ST)*, 2010
47. Hagen, J. B., P. Hsu. The Structure of the Protonosphere above Arecibo. *J. Geophys. Res.* 79, 4269, 1974
48. 2008 Workshop: Space Weather Effects and Aeronomy Studies at the Plasmaspheric Boundary Layer, [http://cedarweb.hao.ucar.edu/wiki/index.php/2008\\_Workshop:Space\\_Weather\\_Effects\\_and\\_Aeronomy\\_Studies\\_at\\_the\\_Plasmaspheric\\_Boundary\\_Layer](http://cedarweb.hao.ucar.edu/wiki/index.php/2008_Workshop:Space_Weather_Effects_and_Aeronomy_Studies_at_the_Plasmaspheric_Boundary_Layer)
49. Dandouras, I. Detection of a Plasmaspheric Wind in the Earth's Magnetosphere by the Cluster Spacecraft. *Ann. Geophys.* 31, 2013
50. Planetary Electrodynamics (Editors: S. C. Coroniti, J. Hughes), 1969
51. The Earth's magnetosphere, text-book chapters 13 – 15  
<http://theory.physics.helsinki.fi/~xfiles/plasma/08/lect07/MagnetosphereS.pdf>
52. Lemaire, J. F., K. I. Gringauz, D. L. Carpenter, V. Bassolo. The Earth's Plasmasphere, 1998
53. The Earth's Plasmasphere: A CLUSTER and IMAGE Perspective (Editors: F. Darrouzet, J. De Keyser, V. Pierrard). Originally published in *Space Science Reviews* Volume 145, Issues 1–2, 2009
54. Kelley, M. C. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics, 2009
55. Plasmasphere, <http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/plasmasphere.html>
56. Menk, F. W., I. R. Mann, A. J. Smith, C. L. Waters, M. A. Clilverd, D. K. Milling. Monitoring the Plasmapause Using Geomagnetic Field Line Resonances. *J. Geophys. Res.* 109, 2004
57. Ili, R. Inner Magnetosphere: Plasma Sheet and Ring Current. GEM 2007 - Student Tutorial, University of Michigan

58. K h a z a n o v, G. V. Kinetic Theory of the Inner Magnetospheric Plasma, 2009
59. N e w e l l, P. T., C.-I. M e n g, Substorm Introduction of  $< 1$ -keV Magnetospheric Ions Into the Inner Plasmasphere. *J. Geophys. Res.* 91, 1986
60. G r i n g a u z, K. The cold plasma throughout the magnetosphere, in: *Physics of Solar Planetary Environments: Vols. I & II* (Editor: D. J. Williams), 1976, p. 672
61. Tu, J., P. S o n g, B. W. R e i n i s c h, X. H u a n g, J. L. G r e e n, H. U. F r e y, P. H. R e i f f. Electron Density Images of the Middle- and High-latitude Magnetosphere in Response to the Solar Wind. *J. Geophys. Res.* 110, 2005
62. D a n d o u r a s, I. The Plasmaspheric Wind. 40th COSPAR Scientific Assembly, 2-10 August 2014, Moscow, Russia. Abstract D3.1-6-14, Publication Date: 2014
63. P i t k ' a n e n, M. Hadron Models and Related New Energy Issues (Editors: F. Smarandache, V. Christianto), 2007, p.78;
64. D a r r o u z e t, F. et al. Density Structures inside the Plasmasphere: Cluster Observations. *Ann. Geophys.* 22, 2004
65. J o h n s t o n, W. R. The Earth's plasmasphere and related electrodynamics, 2006, <http://www.johnstonsarchive.net/physics/ps-paper.html>;
66. J o h n s t o n, W. R. The role of the plasmasphere in radiation belt particle energization and loss. Dissertation, The University of Texas at Dallas, 2009, <http://gradworks.umi.com/33/73/3373943.html>
67. Encyclopedia Britannica, <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/463589/plasmapause>
68. Plasmasphere, <http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/plasmasphere3.html>
69. The Tail of the Magnetosphere, <http://www-spf.gsfc.nasa.gov/Education/wtail.html>
70. M o h a n a k u m a, K. Structure and composition of the lower and middle atmosphere, in: *Stratosphere Troposphere Interactions: An Introduction*, 2008, pp. 1-53
71. M e n k, F., Z. K a l e, M. S c i f f e r, P. R o b i n s o n, C. W a t e r s, R. G r e w, M. C l i l v e r d, I. M a n n. Remote Sensing the Plasmasphere, Plasmapause, Plumes and Other Features Using Ground-based Magnetometers. *J. Space Weather Space Clim.* 4, A34, 2014
72. F r a s e r, B. J., J. L. H o r w i t z, J. A. S l a v i n, Z. C. D e n t, I. R. M a n n. Heavy Ion Mass Loading of the Geomagnetic Field near the Plasmapause and ULF Wave Implications. *Geophys. Res. Lett.* 32, 2005
73. H o r w i t z, J. L., C. R. C h a p p e l l. Observations of Warm Plasma in the Dayside Plasma Trough at Geosynchronous Orbit. *J. Geophys. Res.* 84, 1979
74. D e n t, Z. C., I. R. M a n n. Magnetospheric Cold Plasma Morphology and Dynamics, <http://physics.usask.ca/~koustov/sew/reports/dent.pdf>
75. Space Physics Handout 2 : The Earth's Magnetosphere and Ionosphere, <http://www.sp.ph.ic.ac.uk/~mkd/Handout2.PDF>
76. Ionosphere and magnetosphere. Magnetosphere, <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/1369043/ionosphere-and-magnetosphere/272037/Magnetosphere>
77. G r i n g a u z, K. The cold plasma throughout the magnetosphere, in: *Physics of Solar Planetary Environments: Vols. I & II* (Editor: D. J. Williams), 1976, p.677
78. *Planetary Electrodynamics* (Editors: S. C. Coroniti, J. Hughes), 1969
79. *Magnetospheric Plasma Sources and Losses: Final Report of the ISSI Study Project on Source and Loss Processes of Magnetospheric Plasma* (Editors: B. Hultqvist, M. Øieroset, G. Paschmann, R. Treumann), 1999
80. R u s s e l l, C. T. Configuration of the magnetosphere, in: *Critical Problems of Magnetospheric Physics* (Editor: E. R. Dyer), 1972, p. 1
81. R u s s e l l, C. T. The response of the magnetosphere to the solar wind, in: *The Magnetospheres of The Earth and Jupiter* (Editor: V. Formisano), 1975, pp. 39-53, <http://www-ssc.igpp.ucla.edu/personnel/russell/papers/response/>
82. Van Allen radiation belt, [http://en.wikipedia.org/wiki/Van\\_Allen\\_radiation\\_belt](http://en.wikipedia.org/wiki/Van_Allen_radiation_belt)
83. Earth's radiation belt: Van Allen probes reveal 'zebra stripes' in space, <http://www.sciencedaily.com/releases/2014/03/140319153200.htm>
84. E m i l i a n i, C. Planet Earth: Cosmology, Geology, and the Evolution of Life and Environment, 1992, p.263
85. Ionosphere and magnetosphere, Van Allen radiation belts, <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/1369043/ionosphere-and-magnetosphere/272041/Van-Allen-radiation-belts>
86. Van Allen radiation belt, <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/622563/Van-Allen-radiation-belt>
87. Van Allen Radiation Belts, <http://science.howstuffworks.com/dictionary/astronomy-terms/van-allen-radiation-belts-info.htm>
88. What are Van Allen Belts?, <http://functionspace.org/topic/3607/What-are-Van-Allen-Belts->
89. Radiation Belts Shield Earth From High-Energy Particles, <http://www.space.com/27979-van-allen-belts-barrier-particles.html>

90. Van Allen Radiation Belt, [http://www.redorbit.com/education/reference\\_library/space\\_1/solar\\_system/2574610/van\\_allen\\_radiation\\_belt/](http://www.redorbit.com/education/reference_library/space_1/solar_system/2574610/van_allen_radiation_belt/)
91. Van Allen radiation belt, <http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Van%20Allen%20radiation%20belt>
92. The Van Allen Belts. NASA/GSFC. Retrieved 2011-05-25
93. Radiation belts, <https://wiki oulu.fi/display/SpaceWiki/Radiation+belts>
94. Z h a o, H., X. L i. Modeling Energetic Electron Penetration into the Slot Region and Inner Radiation Belt. *J. Geophys. Res.* 118, 2013
95. Radiation Belts of the Earth, <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Radiation+Belts+of+the+Earth>
96. E s p o s i t o, G. Study of Cosmic Ray Fluxes in Low Earth Orbit Observed with the AMS Experiment. PhD thesis, 2002, p. 24.
97. B e v e l a c q u a, J. J. Health Physics in the 21st Century, 2008, p. 258
98. G h o s h, S. N. Electromagnetic Theory and Wave Propagation. Second Edition, 2002, p.172.
99. C l a e y s, C., E. S i m o e n. Germanium-based Technologies: From Materials to Devices, 2007, p. 228.
100. T a s c i o n e, T. F. Introduction to the Space Environment (Second Edition), 1994
101. Earth's Atmosphere: Radiation Belts, Ionosphere and Exosphere, <http://www.artinaid.com/2013/04/earths-atmosphere-radiation-belts-ionosphere-and-exosphere>
102. Van Allen radiation belts, <http://www.infoplease.com/encyclopedia/science/van-allen-radiation-belts.html>
103. An "Impenetrable Barrier" Protects the Earth from Killer Electrons, <http://io9.com/an-impenetrable-barrier-protects-the-earth-from-kille-1664123021>
104. Electron Radiation Belts, [http://www.fp7-spacecast.eu/help/bg\\_rb.pdf](http://www.fp7-spacecast.eu/help/bg_rb.pdf)
105. S h a o, X., K. P a p a d o p o u l o s, A. S. S h a r m a. Control of the Energetic Proton Flux in the Inner Radiation Belt by Artificial Means. *J. Geophys. Res.* 114, 2009
106. Earth's Atmosphere: Radiation belts, ionosphere and exosphere, <http://www.artinaid.com/2013/04/earths-atmosphere-radiation-belts-ionosphere-and-exosphere/>
107. J o h n s t o n, W. R. The Role of the Plasmasphere in Radiation Belt Particle Energization and Loss, 2007, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.217.57>
108. Van Allen Belts – Description, <http://science.jrank.org/pages/7142/Van-Allen-Belts-Description.html>
109. S h a r m a, S. Atomic And Nuclear Physics, 2008, p. 487
110. D a n d o u r a s, I. Planetary Radiation Belts Detection and Analysis from Low-energy Particle Instruments. HEWG Workshop, Porto Venere, June 2011
111. The NASA LWS Radiation Belt Storm Probe Mission, <http://web.atmos.ucla.edu/~rmt/page9.html>
112. Van Allen Radiation Belt, <http://www.crystalinks.com/vanallenbelt.html>
113. Geocorona, <http://en.wikipedia.org/wiki/Geocorona>
114. D e K e y s e r, J. Structure of the Magnetosphere, <http://www.aeronomie.be/en/topics/solarsystem/magnet-structure-en.pdf>
115. S a t o, M., S. K a m e d a, I. Y o s h i k a w a, M. T a g u c h i, R. F u n a s e, Y. K a w a k a t s u. Development of Geocoronal Hydrogen Lyman Alpha Imaging CAmera (LAICA). Japan Geoscience Union Meeting, Japan, 2014
116. Geocorona, <http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/geocorona.html>
117. Exosphere, <http://en.wikipedia.org/wiki/Exosphere>