

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
Институт за Космически Изследвания и Технологии



Симеон Недков Асеновски

Операционен модел за йонизацията от космически лъчи в йоносферата
и атмосферата COsmic Ray Ionization Model for Ionosphere and
Atmosphere (CORIMIA)

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд за присъждане на образователната и научна степен "доктор"
в област на висшето образование: 4. Природни науки, математика и информатика;
професионално направление 4.1. Физически науки; научна специалност: 01.04.08. „Физика
на океана, атмосферата и околоземното пространство“

Научен ръководител: член кор. Петър Велинов

Научен консултант: доц. д-р Лъчезар Матеев

София, 2012

В настоящата дисертация е разработен и представен оперционния йонизационен модел CORIMIA (COsmic Ray Ionization Model for Ionosphere and Atmosphere), който е част от проекта SG 1.1 of COST Action ES0803 "Developing space weather products and services in Europe"(2008-2012) към 7-ма Рамкова Програма на Европейския Съюз.

Дисертацията е посветена на 100 годишнината от откриването на космическите лъчи на 7 август 1912 год. от проф. Виктор Хес.

Дисертацията е изготвена в секция „Космическа геофизика” на Института за космически изследвания и технологии при БАН в периода 2010 - 2012.

1 Въведение

Обект на настоящата дисертация е йонизационното състояние на областта 30-100 km на средната атмосфера вследствие нейното взаимодействие с космическите лъчи от галактически, слънчев и междупланетен произход. В тази област е разположена ниската йоносфера (50-100 km), която в много отношения е най-интересната част от цялата йоносфера, защото тя се явява буферна зона между космическите въздействия отгоре (Velinov et al., 1974, 2005a, 2009; Usoskin et al., 2009) и метеорологическите влияния отдолу (Velinov et al., 1992; Velinov and Tonev, 1994, 1995a,b; Eroshenko et al., 2010).

Тази част от йоносферата се създава от най-проникващите радиации: ултравиолетови, рентгенови и космически лъчи, които се явяват твърде чувствителен показател на слънчевата активност (Nestorov, 1969). Под 75 km приносът на космическите лъчи (КЛ) доминира над приноса на електромагнитните радиации и по такъв начин КЛ формират самостоятелен космически слой в долната част на йоносферата Velinov (1966a, 1968a). Предмет на настоящата дисертация е пълното изследване на космическия слой и йонизационното състояние на средната атмосфера.

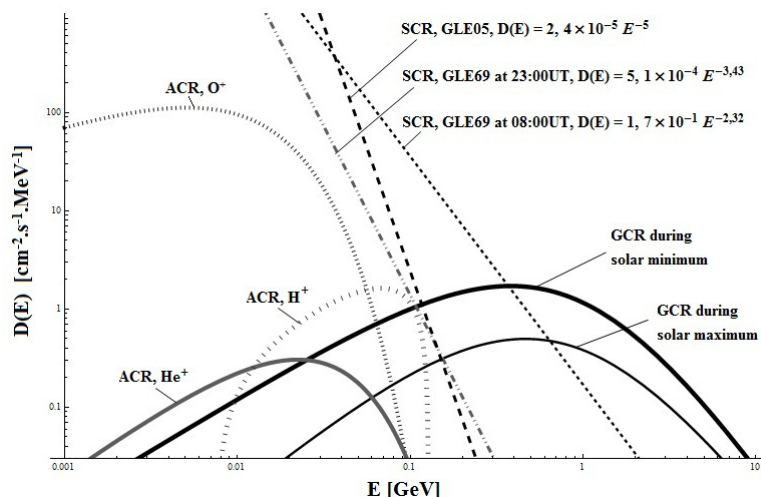
Разработени са теоретичните основи на междинните (2 + 1, 3 + 1 и 4 + 1 интервални) йонизационни модели (Velinov and Mateev, 2007b; Velinov et al., 2006a, 2011a, 2013a) и на пълния (5 + 1 интервален) модел CORIMIA (COsmic Ray Ionization Model for Ionosphere and Atmosphere) (Velinov et al., 2012a,b,c, 2013b,c).

2 Основни сведения за космическите лъчи и йоносферата

2.1 Космическите лъчи в Слънчевата система

В началото на 20 век учените все още не могат да дадат обяснение на йонизационното лъчение в атмосферата на планетата Земя. Дълго време се считало, че то се дължи на радиоактивността на Земята, която неотдавна беше открита от Бекерел, Пиер и Мари Кюри. В периода 1911 - 1912 година австрийският физик Виктор Хес извършва серия електроскопични балонни експерименти, с които показва, че радиацията в атмосферата нараства с увеличаване на надморската височина (Hess, 1912). На 7 август 1912 Хес извършва решителния седми балонен полет, който категорично потвърждава, че търсената радиация идва от Космоса.

Откритията на Хес поставят началото на изследванията в областта на космическите лъчи (КЛ) и дават сериозен тласък в развитието на космическата физика, космологията и физиката на високите енергии и елементарните частици. Произходът, ускорението и на-



Фигура 2.1: Космическите лъчи в Слънчевата система (Velinov et al., 2013b). На Фигурата са представени спектрите на основните видове космически лъчи - галактически, слънчеви и аномални. Показани са потоците на ГКЛ в случаите на минимум и максимум на слънчевата активност, три от основните компоненти на АКЛ - O^+ , H^+ и He^+ , както и три спектъра на СКЛ, които представляват най-значителните слънчеви протонни събития от началото на космофизическите изследвания - GLE05 (23.02.1956) и GLE69 (20.01.2005).

чинът на транспорт на високо енергетични заредени частици в Космоса се превръщат във фундаментални проблеми при изучаването на Вселената. Въпросите свързани с влиянието на космическите лъчи върху различни физически и биологически процеси и обекти се оказват много актуални и понастоящем вълнуват все повече учени.

Сега знаем, че КЛ са високо енергетични заредени частици с различен произход и състав. В зависимост от произхода си те се делят на галактически, слънчеви и аномални космически лъчи. На Фигура 2.1 са представени спектрите на трите вида космически лъчи в Слънчевата система. Показани са потоците на галактическите космически лъчи (ГКЛ) при минимум и максимум на слънчева активност, три от компоненти на аномалните космически лъчи (АКЛ) - O^+ , H^+ и He^+ , както и три спектъра на слънчеви космически лъчи (СКЛ) за които се предполага, че са причинени от най-значителните слънчеви протонни събития от началото на космофизическите изследвания.

КЛ непрекъснато "бомбандират" земната атмосфера и влияят върху редица физически и химически процеси. Те предизвикват йонизация, която нараства с нарастване на геомагнитната ширина и намаляване на слънчевата активност (Velinov and Mateev, 2008a,b; Velinov et al., 2009, 2011a,b).

2.2 Галактически космически лъчи

Галактическите космически лъчи (ГКЛ) представляват частици с високи енергии, които произхождат от космически обекти извън Слънчевата система. Те се движат със скорост близка до скоростта на светлината и имат изотропно разпределение по ъгли в области близо до Земята (Mewaldt, 1996). Потокът от ГКЛ се състои предимно от атомни ядра, от които

89% са протони, 10% хелий и 1% ядра на по-тежки елементи (Velinov, 1966a, 1968a; Velinov et al., 1974).

2.3 Слънчеви космически лъчи

Слънчевото корпускулярно излъчване има две компоненти. Едната, която е относително постоянна във времето, е слънчевия вятър. Това е сравнително ниско енергетична компонента. Втората компонента е импулсна и се нарича слънчеви енергетични частици (solar energetic particles - SEP) или исторически слънчеви космически лъчи (СКЛ) (Velinov, 1968a,c, 1970, 1971, 1974).

СКЛ са наблюдавани за пръв път като кратковременни увеличения на скоростта на йонизация на повърхността на Земята на 28 февруари 1942 година (Dorman, 2004; Mewaldt et al., 2005). Това явление се нарича още Ground Level Enhancement (GLE) спрямо нормалния поток ГКЛ.

2.4 Аномални космически лъчи

Аномалните космически лъчи (АКЛ) са допълнителна компонента към състава на ГКЛ и се състоят предимно от протони p , хелиеви ядра He^+ , кислород O^+ , неон Ne^+ и незначителни количества въглерод C^+ (Velinov, 1991, 2004; Klecker, 1995; Ruder et al., 2004; Velinov and Mateeov, 1992, 2005a; Velinov et al., 2001). Те имат енергии в диапазона от 10 до 300 MeV/nucleon. Измерванията на интензитета на АКЛ изискват периоди на сравнително спокойна слънчева обстановка, за да бъдат избегнати смущения, дължащи се на потоци от СКЛ (Leske et al., 2011).

2.5 Земна атмосфера

Земната атмосфера е газовата обвивка на Земята. Нейните основни физически процеси са близки до тези на другите планетарни атмосфери. Разлики се изразяват в съставните компоненти на атмосферите, скоростта на въртене, гравитационното привличане и магнитното поле на съответната планета, както и отдалечеността от Слънцето. Всички тези изброени фактори въздействат значително върху вертикалното разпределение и разслоение на атмосферата, абсорбцията на слънчева радиация, взаимодействието със слънчевия вятър и високоенергетичните частици (ГКЛ, АКЛ, SEP и др.), както и върху електрическите параметри и токови системи на съответната планетна атмосфера.

Около 99% от атмосферата е под формата на азот N_2 (~ 78%) и кислород O_2 (~ 21%). Атмосферата на Земята няма ясно изразена горна граница. Най-външните ѝ слоеве се простират до няколко хиляди километра височина, но 90 % от нейната маса е съсредоточена в приземния слой (до 15-16 km). Земната атмосфера е формирана в условията на относително силно гравитационно и вътрешно магнитно поле на Земята и до голяма степен тя е предпазена (екранирана) от директното въздействие на слънчевия вятър.

По своите физически свойства атмосферата е нееднородна — както във вертикално така и в хоризонтално направление. С увеличаване на надморската височина се изменят съставът и редица други нейни свойства и параметри. Съществуват няколко области на атмосферата, разделени на базата на температурни особености - тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера и екзосфера.

2.6 Земна йоносфера

Йоносферата представлява плазмената обвивка на Земята. Основно влияние при образуването на йоносферата оказват X- и UV- радиации и космически лъчи (Nestorov, 1969; Serafimov, 1970; Velinov et al., 1974).

Името "йоносфера" е предложено през двадесетте години на 20-ти век от нейния откривател сър Едуард Ешпълтън, който за това получи Нобелова премия по физика през 1947 г. Терминът "йоносфера" е окончателно утвърден през 1950 г. от комитета при Института на електро- и електронните инженери (IEEE). Определението, дадено от IEEE гласи: „йоносферата е част от високата земна атмосфера, където йоните и електроните се срещат в количества, достатъчни да повлияят върху разпространението на радиовълните”. Йоносферата е съставена от няколко слоя - D, E, F1 и F2, които отразяват радиовълните от различни честотни диапазони.

Слоят D е най-вътрешният слой на йоносферата и се простира на височина от 50 до 90-100 km. Образуването на слоя D се дължи на йонизацията на азота и кислорода от слънчевата радиация и от галактическите космически лъчи. Те формират в долната част на D слоя т.н. космически слой (C layer) (Nestorov, 1969; Velinov et al., 1974).

При слънчеви хромосферни ерупции (Velinov and Nestorov, 1967) и особено след протонни събития, йонизацията в слоя D може да достигне необичайно големи стойности на средните и високите ширини (Velinov, 1968a,c).

2.7 Исторически преглед на проблема за йоносферата и взаимодействието ѝ с космическите лъчи

Изследванията показват, че всички йоносферни слоеве: D, E и F (F1 и F2) се оказват в силна зависимост от зенитния ъгъл на Слънцето (денонощни и сезонни вариации) и индексите на слънчевата активност (11-годишни вариации). Изключение прави само основата на йоносферата в интервала 50-80 km. Ето защо още ? предложи схема на двуслойна ниска йоносфера. Хипотезата за съществуването на два слоя D1 и D2 (респективно, слънчево-независим и слънчево-зависим) беше използвана от Bracewell and Bain (1952) и др. Krasnushkin (1962) пръв получи по експериментален път профила на по-ниския слой D1. Член кор. Г. Несторов показва, че слой D1 има анти-корелация със слънчевата активност (Nestorov, 1963). И тъй като там единственият йонизационен източник се явяват галактическите космически лъчи, той предположи, че именно те са образуващият фактор на слоя D1. Впоследствие този слой беше наречен космически слой C, разположен в ниската йоносфера (50-100 km) (Velinov et

al., 1974). Слой С е предимно йонен слой (Velinov et al., 1984) и е важен за разпространението на средните, дългите и свръхдългите радиовълни (Velinov, 1965; Nestorov and Velinov, 1965) при спокойни и смутени (Velinov and Nestorov, 1967) условия.

Космическият слой и цялата ниска йоносфера са подложени, както на космически въздействия отгоре, така и на силни метеорологически и електрически въздействия отдолу (Velinov et al., 1992; Velinov and Tonev, 1994, 1995a,b). Така че слой С и ниската йоносфера се явяват тази буферна зона, където се срещат влиянията на Космоса и на Земята (Nestorov, 1969, 1986; Velinov et al., 1974).

През 1965 под ръководството на член кор. Г. Несторов в Геофизическия институт на БАН (секция „Физика на йоносферата“) започнаха теоретични изследвания и моделиране на йонизацията на галактическите космически лъчи в ниската йоносфера, като бяха изведени първите формули за скоростта на електронната продукция в космическия слой С вследствие проникването на релятивистични (Velinov, 1966a) и субрелятивистични частици.

Тези теоретични профили бяха сравнени с първите данни от ракетни експерименти в средната и висока атмосфера с помощта на трофейната ракета V2 (Van Allen, 1952) и с числените оценки на Moler (1960) и Nicolet and Aikin (1960), направени въз основа на тези емпирични ракетни резултати.

Първите формули за йонизацията в космическия слой С бяха изведени въз основа на една опростена апроксимация на йонизиционните загуби на ГКЛ. Така че, те не бяха достатъчно точни. Те се базираха на т.н. Thin Target Model (TTM) (Модел „Тънка Мишена“), който е валиден само за йоносферата, т.е. за височини над 50 km (Usoskin et al., 2009).

По-нататъшното подобрене на тези резултати беше извършено последователно от Velinov (1968a,b,c,d, 1970, 1971, 1974); O'Brien (1971); Velinov et al. (1974); Dorman and Krupitskaya (1975); Dorman and Kozin (1983) и др. Бяха разработени модели от типа на т.н. Intermediate Target Model (ITM) (Модел „Междинна Мишена“), който е валиден за височини над 25-30 km в средната атмосфера (където е разположен максимумът на озоносферата).

За ниската атмосфера (тропосферата) и средната атмосфера до височини 25 km трябва да се използват модели от типа на т.н. Full Target Model (FTM) (Модел „Пълна Мишена“) (Velinov and Mishev, 2007; Velinov et al., 2009; Usoskin et al., 2009; Desorgher et al., 2005). FTM е базиран на пълната Monte Carlo симулация на атмосферните каскади. Те позволяват изчислението на взаимодействията на космическите лъчи с планетните атмосфери до високи и много високи енергии. Към групата модели FTM се отнасят програмите CORSIKA (COsmic Ray SIMulations for KAscade) (Heck et al., 1997) и GEANT4 (Agostinelli et al., 2003) с нейния code PLANETOCOSMICS (Desorgher et al., 2005). Между споменатите два модела се наблюдава сравнително добро съгласуване (Usoskin et al., 2009; Velinov et al., 2009; Mishev, 2010).

Обаче тези FTM програми не са приложими за височини над 25-30 km поради малката дълбочина на атмосферата (съответно твърде малката статистика) там. Ето защо за областта над 30-35 km са актуални моделите от типа ITM (Dorman and Kozin, 1983; Velinov et al., 2009), а над 50 km - опростените TTM програми (Velinov, 1966a, 1991).

В настоящата дисертация ще бъде разработен и представен новия ITM усъвършенстван

оперционен модел CORIMIA (COsmic Ray Ionization Model for Ionosphere and Atmosphere), който е част от проекта SG 1.1 of COST Action ES0803 "Developing space weather products and services in Europe"(2008-2012) към 7-ма Рамкова Програма на Европейския Съюз.

Това е важно за възможните приложения на модела CORIMIA в различните аспекти на слънчево-земната физика, космическото време и космическия климат (Tassev et al., 2003; Velinov and Tonev, 1994, 1995a,b).

3 Цели и задачи на дисертационния труд

Дисертационният труд е насочен към изследване на йонизационните процеси в средната атмосфера и ниската йоносфера вследствие на въздействието на космическите лъчи и създаването на перманентна йонизация в тези области, което до голяма степен определя физическите им процеси и характеристики и способността им да провеждат слънчево-земните въздействия.

Основните цели на дисертационния труд са:

I. Да се създаде аналитичен модел за пресмятане на йонизацията на йоносферата и средната атмосфера от галактически, слънчеви и аномални космически лъчи, който е подобрение на съществуващите модели, предложени от Dorman (2004); Velinov et al. (2004, 2005a, 2006a, 2009); Velinov and Mateev (2007b, 2008a,b); Usoskin et al. (2009).

II. На базата на аналитичния модел да се създаде числен алгоритъм COsmic Ray Ionization Model for Ionosphere and Atmosphere (CORIMIA) за оперативна работа по определяне йонизацията на атмосферата от различните видове космически лъчи.

III. Да се направи количествена оценка на йонизационните профили при преминаването на космически лъчи за различна височина, геомагнитна ширина и при различни нива на слънчева активност.

IV. Да се направи оценка на влиянието на различните физически параметри (височина, геомагнитна ширина, геомагнитен и атмосферен праг на отрязване, плътност на атмосферата, заряд на космическите лъчи и др.) върху скоростта на образуване на електрони и йони вследствие на проникването на космически лъчи в йоносферата и средната атмосфера.

Задачите, които ще бъдат решени за постигане на първата цел I., са:

1. Извеждане на аналитичните изрази за йонизационните загуби dE/dh и скоростта на йонизация $q(h)$ за различните енергетични интервали и за всички възможни енергетични преходи между отделните интервали.

1а. Извеждане на аналитичните изрази за дву-, три- и четири-интервална апроксимация на формулата на Бор-Бете-Блох за йонизационните загуби (Sternheimer, 1961) и съответните формули за скоростта на йонизация $q(h)$ в йоносферата и атмосферата (междинен модел CORIMIA).

1б. Извеждане на съответните аналитични изрази и формули за $q(h)$ при пет-интервална апроксимация плюс интервал на намаление на заряда за функцията на йонизационните загуби на първичните космически ядра със заряд $Z \geq 2$ (пълен модел CORIMIA).

Задачата, която ще бъде решена за постигане на втората цел II., е:

2. Реализиране на числен алгоритъм CORIMIA за пресмятане на електронната продукция $q(h)$, базиран на 1а и 1б.

Задачите, които ще бъдат решени за постигане на последните две цели III. IV., са:

3. Извършване на числени пресмятания за скоростта на образуване на електрони и йони вследствие на преминаване на галактически, слънчеви и аномални космически лъчи през йоносферата и средната атмосфера със създадения програмен продукт CORIMIA.

4. Анализирание на конкретни екстремални случаи на проявления на слънчевата активност, свързани с протонни ерупции и слънчеви енергетични частици, имащи важно значение за определяне на радиационната обстановка на Земята и близкия Космос и за радиокомуникациите (Nestorov and Velinov, 1965; Velinov, 1965), за състоянието на озона (Tassev et al., 2003) и електрическите полета (Velinov and Tonev, 1994, 1995a,b) в околното пространство.

4 Описание на модела

4.1 Постановка на задачата

В диапазона $30 \text{ km} \leq h \leq 120 \text{ km}$ височина съществен принос към образуването на свободни електрони вследствие на електромагнитни взаимодействия има потока от космически лъчи (Moler, 1960; Nicolet and Aikin, 1960; Velinov, 1966a, 1968a,c; Dorman and Krupitskaya, 1975; Velinov and Mishev, 2007; Usoskin et al., 2009; Velinov et al., 1974, 2009).

Независимо един от друг Bohr, Bethe и Bloch разработват теория, описваща йонизационните загуби на заредена частица, която преминава през вещество. Резултатите от тази теория са обобщени чрез функцията на йонизационните загуби dE/dh (формулата на Бор-Бете-Блох).

Накратко тази формула описва как една заредена частица губи енергия чрез електро-

магнитни взаимодействия в зависимост от моментната си кинетична енергия и плътността на веществото, през което преминава. Сложността на функцията обаче не позволява тя да бъде използвана за детайлното ѝ анализиране. Експерименталните данни (Sternheimer, 1961; Dorman, 2004), показват известно отклонение от така представената функция. Ето защо за по-качествено описание и апроксимиране до експерименталните данни се налага дискретизация на функцията на Бор-Бете-Блох, т.е. налага се разделянето на функцията на отделни енергетични интервали.

Разгледани са последователно случаите на апроксимация за две, три, четири и пет характерни енергетични интервала на функцията на йонизационните загуби (dE/dh), като същевременно е направена ретроспекция на развитието на модела. Изведени са аналитичните изрази при различните случаи на апроксимация на функцията на йонизационните загуби, както и за различните групи ядра на космическите лъчи (Velinov, 1966a, 1968a; Velinov et al., 1974): протони - p , α (алфа) частици (които представляват хелиеви ядра), леки ядра (L) - $3 \leq Z \leq 5$, средни ядра (M) - $6 \leq Z \leq 9$, тежки ядра (H) - $10 \leq Z \leq 19$ и много тежки ядра (VH) - $Z \geq 20$.

При изчисляване на скоростта на образуване на свободни електрони вследствие на преминаване на поток от заредени космически лъчи ще се използва 3D модел за електронната продукция (Velinov et al., 1974, 2003, 2004; Dorman, 2004):

$$q(h) = \sum_i q_i(h) = \frac{1}{Q} \sum_i \int_{E_i}^{\infty} \int_{A=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2+\Delta\theta} D_i(E) \left(\frac{dE}{dh} \right)_i \sin\theta d\theta dA dE, \quad (4.1)$$

където $q(h)$ е скоростта на образуване на свободни електрони, $Q = 35\text{eV}$ е енергията, необходима за образуването на една електрон-йон двойка, E_i са ефективните прагове на отрязване (атмосферен или геомагнитен праг на отрязване), които се определят от формулата $E_{eff} = \max\{E_R, E_A\}$. $E_R = \sqrt{R^2 + 0.88} - 0.938$ е геомагнитен праг на отрязване, E_A е атмосферен праг на отрязване. A е азимутален ъгъл, θ е ъгълът по вертикала, dE/dh са функциите на йонизационни загуби за различните интервали. $D_i(E)$ са спектрите на навлизащите космически лъчи (ГКЛ, СКЛ и АКЛ).

4.2 Етапи на развитие на модела за изчисляване на електронната продукция от космически лъчи в атмосферата на Земята

През 1988-1990 г. функцията на йонизационните загуби dE/dh е приложена за числено пресмятане на скоростта на електронната продукция $q(h)$ от различни ядра на космическите частици (Velinov and Mateev, 1990a). Резултатът е разслояване на профила на електронната продукция в зависимост от заряда на различните частици. По-късно при численото моделиране се въвежда дву-интервална апроксимация за по-добро приближение към експерименталните данни (Velinov and Mateev, 1990b,c). Важна особеност при този етап е допускането, че броя на частиците остава постоянен при проникването им, като се въвежда съответен нормировъчен коефициент на диференциалния спектър.

Въвеждането на междинен интервал в дву-интервалната апроксимация на dE/dh увеличава значително точността при числените пресмятания на $q(h)$ (Velinov et al., 2004, 2005a; Velinov and Mateev, 2005a,b, 2008a,b). Увеличаването на броя на интервалите на апроксимация е следваща стъпка при усъвършенстването на модела (Velinov and Mateev, 2005b,c; Velinov et al., 2005b,d, 2006a). Тук бяха разработени 3-интервален (Velinov and Mateev, 2006a,b) и 4-интервален (Velinov and Mateev, 2007a,b) модели. В тези случаи горната граница на интегриране се намира в предварително фиксиран енергиен интервал на апроксимация.

Последният етап бе въвеждането на 5-интервална апроксимация на формулата на Бор-Бете-Блох с междинен интервал (Velinov and Mateev, 2007c,d; Velinov et al., 2008a,b,c). Тази версия включва въвеждане на граници на интегриране в произволен енергетичен интервал.

4.3 Пет-интервална апроксимация на функцията на йонизационните загуби dE/dh

В дисертационния труд подробно е разглеждана функцията на йонизационните загуби dE/dh за дву-, три- и четири-интервална апроксимация. При тези апроксимации енергиите на навлизащите в атмосферата космически лъчи са от 0.15 MeV до 5×10^6 MeV. Естествен въпрос, който възниква, е дали космически лъчи с енергии под 0.15 MeV имат принос към електронната продукция в средната атмосфера и ниската йоносфера. Този въпрос налага разширяване на модела за четири-интервалната апроксимация, като се въвежда допълнителен пети интервал, който да описва именно космическите лъчи с енергии под 0.15 MeV (Velinov and Mateev, 2007c,d; Velinov et al., 2008a,b,c).

4.3.1 Частици със заряд $Z > 1$

Заключителната част от математическата формулировка на модела за изчисляване на електронна продукция вследствие на преминаване на поток от космически лъчи през земната атмосфера е за пет-интервална апроксимация на функцията на йонизационните загуби в случая на частици със заряд $Z > 1$. Така освен петте интервала описващи случая на йонизиращи частици с $Z = 1$ се въвежда и допълнителен интервал на намаление на заряда. Тогаво функцията на йонизационните загуби се изразява по следния начин (Velinov et al., 2008a,b,c, 2012a):

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dh} = \begin{cases} 2570E^{0.5} & kT \leq E \leq 0.15 \text{ MeV} & \text{Интервал 1} \\ 1540E^{0.23} & 0.15 \leq E \leq 0.15Z^2 = E_a & \text{Интервал 2*} \\ 231E^{-0.77} & E_a \leq E \leq 200 \text{ MeV} & \text{Интервал 2} \\ 68E^{-0.53} & 200 \leq E \leq 850 \text{ MeV} & \text{Интервал 3} \\ 1.91 & 850 < E \leq 5000 \text{ MeV} & \text{Интервал 4} \\ 0.66E^{0.123} & 5 \leq E \leq 5000 \text{ GeV} & \text{Интервал 5,} \end{cases} \quad (4.2)$$

където E (MeV) е кинетичната енергия на навлизащата заредена частица, h (g.cm^{-2}) е количеството преминалото вещество - в случая на земната атмосфера това е дълбочината

на атмосферата в (g.cm^{-2}), ρ е плътността на веществото. Интервал 2* е интервалът на намаление на заряда. Когато частицата има заряд $Z = 1$, този интервал изчезва (случая на проникващи протони).

Всяка частица от състава на потока на космическите лъчи преди навлизането си в атмосферата на планетата Земя има специфична начална енергия E_k . При навлизането в атмосферата тази частица започва да губи енергия по закона за енергийни загуби на съответния интервал. При извеждането на законите за енергийните загуби на отделните интервали се използва количеството преминало вещество \tilde{h} (g.cm^{-2}), което се изразява като (Velinov, 1966a, 1968a; Velinov et al., 1974):

$$\tilde{h} = \int \rho(h)dh, \quad (4.3)$$

където $\rho(h)$ е плътността на атмосферата на надморска височина h . Количеството преминало вещество \tilde{h} , е веществото през което преминава йонизиращата частица при движението си в атмосферата, преди да бъде абсорбирана вследствие на йонизационни загуби.

Използвайки \tilde{h} може да представим съответните закони за йонизационни загуби на отделните интервали. Когато навлизаща в атмосферата частица има кинетична енергия в диапазона $kT \leq E_k \leq 0.15$, то тя се характеризира със следното преминало количество вещество:

$$\tilde{h} = \tilde{h}_1 = \frac{A}{2570} \int_{E_1(h)}^{E_k} \frac{dE}{E^{0.5}} = \frac{A}{1285} (E_k^{0.5} - E_1^{0.5}(h)). \quad (4.4)$$

От уравнение (4.4) може да изразим закона за енергийните загуби за Интервал 1 (Velinov et al., 2008a,b,c):

$$E_1(h) = \left(E_k^{0.5} - \frac{1285}{A} \tilde{h} \right)^2. \quad (4.5)$$

Законите за енергийните загуби за останалите интервали са изведени аналогично (Velinov et al., 2008a,b,c):

$$E_{2^*}(h) = \left(E_k^{0.77} - \frac{1185.8}{A} \tilde{h} \right)^{1.3}. \quad (4.6)$$

$$E_2(h) = \left(E_k^{1.77} - \frac{408.87Z^2}{A} \tilde{h} \right)^{0.56}. \quad (4.7)$$

$$E_3(h) = \left(E_k^{1.53} - \frac{104.04Z^2}{A} \tilde{h} \right)^{0.65}. \quad (4.8)$$

$$E_4(h) = E_k - \frac{1.91Z^2}{A} \tilde{h}. \quad (4.9)$$

$$E_5(h) = \left(E_k^{0.877} - \frac{0.58Z^2}{A} \tilde{h} \right)^{1.14}. \quad (4.10)$$

В процеса на описание на модела за пресмятане на електронна продукция следва да бъдат изведени уравненията за атмосферните прагове на отрязване за отделните интервали. За първия интервал имаме (Velinov et al., 2008b):

$$\tilde{h} = \tilde{h}_1 = \frac{A}{2570} \int_{kT}^{E_{A1}(h)} \frac{dE}{E^{0.5}} = \frac{A}{1285} (E_{A1}^{0.5} - (kT)^{0.5}). \quad (4.11)$$

от където за атмосферния праг на отрязване получаваме:

$$E_{A1}(h) = \left((kT)^{0.5} + \frac{1285}{A} \tilde{h} \right)^2. \quad (4.12)$$

Аналогично за останалите атмосферни прагове имаме (Velinov et al., 2008b):

$$E_{A2^*}(h) = \left(0.15^{0.77} + \frac{1185.8}{A} \tilde{h} - 0.92 (0.15^{0.5} - (kT)^{0.5}) \right)^{1.3}, \quad (4.13)$$

$$E_{A2}(h) = \left(E_a^{1.77} + \frac{408.87Z^2}{A} \tilde{h} - 0.32Z^2 (0.15^{0.5} - (kT)^{0.5}) - 0.34Z^2 (E_a^{0.77} - 0.15^{0.77}) \right)^{0.56}, \quad (4.14)$$

$$E_{A3}(h) = \left(200^{1.53} + \frac{104.04Z^2}{A} \tilde{h} - 0.08Z^2 (0.15^{0.5} - (kT)^{0.5}) - \right. \\ \left. - 0.09Z^2 (E_a^{0.77} - 0.15^{0.77}) - 0.25 (200^{1.77} - E_a^{1.77}) \right)^{0.65}, \quad (4.15)$$

$$E_{A4}(h) = 850 + \frac{1.91Z^2}{A} \tilde{h} - 0.001Z^2 (0.15^{0.5} - (kT)^{0.5}) - 0.002Z^2 (E_a^{0.77} - 0.15^{0.77}) - \\ - 0.005 (200^{1.77} - E_a^{1.77}) - 0.018 (850^{1.53} - 200^{1.53}). \quad (4.16)$$

$$E_{A5}(h) = \left(5000^{0.877} + \frac{0.58Z^2}{A} \tilde{h} - 0.0005Z^2 (0.15^{0.5} - (kT)^{0.5}) - \right. \\ \left. - 0.0006Z^2 (E_a^{0.77} - 0.15^{0.77}) - 0.001 (200^{1.77} - E_a^{1.77}) - \right. \\ \left. - 0.006 (850^{1.53} - 200^{1.53}) - 0.303 (5000 - 850) \right)^{1.14} \quad (4.17)$$

Освен изведените закони за енергийни загуби на отделните интервали е необходимо да се представят и законите за енергийни загуби в случаите, когато енергията на навлизащата в атмосферата частица пресича граници на интервали. Когато кинетичната енергия пресича само една граница на интервал имаме следните възможности:

- кинетичната енергия пресича горната граница на Интервал 1 - $E_{2^*1}(h)$;
- енергията пресича горната граница на Интервал 2* - $E_{22^*}(h)$;
- енергията пресича горната граница на Интервал 2 - $E_{32}(h)$;
- енергията пресича горната граница на Интервал 3 - $E_{43}(h)$;
- енергията пресича горната граница на Интервал 4 - $E_{54}(h)$.

Когато енергията на частицата пресече границата от 0.15 MeV, количеството преминато вещество \tilde{h} се изразява като (Velinov et al., 2008a,b,c, 2012a):

$$\tilde{h} = \tilde{h}_1 + \tilde{h}_2^* = \frac{A}{2570} \int_{E_{2^*1}}^{0.15} \frac{dE}{E^{0.5}} + \frac{A}{1540} \int_{0.15}^{E_k} \frac{dE}{E^{0.23}} = \\ = \frac{A}{1285} (0.15^{0.5} - E_{2^*1}^{0.5}) + \frac{A}{1185.8} (E_k^{0.77} - 0.15^{0.77}). \quad (4.18)$$

От уравнение (4.18) може да изведем закона за енергийни загуби $E_{2*1}(h)$ (Velinov et al., 2008a,b,c):

$$E_{2*1}(h) = \left(0.15^{0.77} - \frac{1285}{A} \tilde{h} + 1.08 (E_k^{0.77} - 0.15^{0.77}) \right)^2. \quad (4.19)$$

Аналогично за другите случаи на пресичане на една граница имаме:

$$E_{22*}(h) = \left(E_a^{0.77} - \frac{1185.8}{A} \tilde{h} + \frac{2.9}{Z^2} (E_k^{1.77} - E_a^{1.77}) \right)^{1.3}, \quad (4.20)$$

$$E_{32}(h) = \left(200^{1.77} - \frac{408.87Z^2}{A} \tilde{h} + 3.93 (E_k^{1.53} - 200^{1.53}) \right)^{0.56}, \quad (4.21)$$

$$E_{43}(h) = \left(850^{1.53} - \frac{104.04Z^2}{A} \tilde{h} + 54.47 (E_k - 850) \right)^{0.65}, \quad (4.22)$$

$$E_{54}(h) = 5000 - \frac{1.91Z^2}{A} \tilde{h} + 3.29 (E_k^{0.877} - 5000^{0.877}). \quad (4.23)$$

Когато кинетичната енергията на навлизащата частица пресича две граници на интервали са възможни следните четири случая:

- енергията пресича границите E_a и 0.15 MeV - $E_{21}(h)$;
- енергията пресича границите от 200 MeV и 0.15 MeV - $E_{32*}(h)$;
- енергията пресича границите от 850 MeV и 200 MeV - $E_{42}(h)$;
- енергията пресича границите от 5000 MeV и 850 MeV - $E_{53}(h)$.

Количеството преминало вещество в случая на пресичане на горните граници на Интервал 1 и Интервал 2* е:

$$\begin{aligned} \tilde{h} &= \tilde{h}_1 + \tilde{h}_2^* + \tilde{h}_2 = \frac{A}{2570} \int_{E_{21}}^{0.15} \frac{dE}{E^{0.5}} + \frac{A}{1540} \int_{0.15}^{E_a} \frac{dE}{E^{0.23}} + \frac{A}{231Z^2} \int_{E_a}^{E_k} \frac{dE}{E^{-0.77}} = \\ &= \frac{A}{1285} (0.15^{0.5} - E_{21}^{0.5}) + \frac{A}{1185.8} (E_a^{0.77} - 0.15^{0.77}) + \frac{A}{408.87Z^2} (E_k^{1.77} - E_a^{1.77}). \end{aligned} \quad (4.24)$$

От уравнение (4.24) ще изразим закона за енергийни загуби между Интервал 1 и Интервал 2 (Velinov et al., 2012a):

$$E_{21}(h) = \left(0.15^{0.5} - \frac{1285}{A} \tilde{h} + 1.08 (E_a^{0.77} - 0.15^{0.77}) + \frac{3.14}{Z^2} (E_k^{1.77} - E_a^{1.77}) \right)^2. \quad (4.25)$$

Останалите три случая на пресичане на две граници имат вида (Velinov et al., 2012a):

$$E_{32*}(h) = \left(E_a^{0.77} - \frac{1185.8}{A} \tilde{h} + \frac{2.9}{Z^2} (200^{1.77} - E_a^{1.77}) + \frac{11.4}{Z^2} (E_k^{1.53} - 200^{1.53}) \right)^{1.3}, \quad (4.26)$$

$$E_{42}(h) = \left(200^{1.77} - \frac{408.87Z^2}{A} \tilde{h} + 3.93 (850^{1.53} - 200^{1.53}) + 214.07 (E_k - 850) \right)^{0.56}, \quad (4.27)$$

$$E_{53}(h) = \left(850^{1.53} - \frac{104.04Z^2}{A} \tilde{h} + 54.47 (5000 - 850) + 179.38 (E_k^{0.877} - 5000^{0.877}) \right)^{0.65}. \quad (4.28)$$

Когато енергията на навлизащата частица пресича три граници на интервали са възможни три случая:

- енергията на навлизащата частица пресича горната граница на Интервал 1, горната граница на Интервал 2* и горната граница на Интервал 2 - $E_{31}(h)$;

- енергията на навлизащата частица пресича горната граница на Интервал 2*, горната граница на Интервал 2 и горната граница на Интервал 3 - $E_{42^*}(h)$;

- кинетичната енергия на навлизащата частица пресича горната граница на Интервал 2, горната граница на Интервал 3 и горната граница на Интервал 4 - $E_{52}(h)$. За първия от трите случая имаме съответно (Velinov et al., 2012a):

$$\begin{aligned}
 \tilde{h} &= \tilde{h}_1 + \tilde{h}_2^* + \tilde{h}_2 + \tilde{h}_3 = \\
 &= \frac{A}{2570} \int_{E_{31}}^{0.15} \frac{dE}{E^{0.5}} + \frac{A}{1540} \int_{0.15}^{E_a} \frac{dE}{E^{0.23}} + \frac{A}{231Z^2} \int_{E_a}^{200} \frac{dE}{E^{-0.77}} + \frac{A}{68Z^2} \int_{200}^{E_k} \frac{dE}{E^{-0.53}} = \\
 &= \frac{A}{1285} (0.15^{0.5} - E_{31}^{0.5}) + \frac{A}{1185.8} (E_a^{0.77} - 0.15^{0.77}) + \\
 &+ \frac{A}{408.87Z^2} (200^{1.77} - E_a^{1.77}) + \frac{A}{104.04Z^2} (E_k^{1.53} - 200^{1.53}) \Rightarrow
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

$$\begin{aligned}
 E_{31}(h) &= \left(0.15^{0.5} - \frac{1285}{A} \tilde{h} + 1.08 (E_a^{0.77} - 0.15^{0.77}) + \right. \\
 &\left. + \frac{3.14}{Z^2} (200^{1.77} - E_a^{1.77}) + \frac{12.35}{Z^2} (E_k^{1.53} - 200^{1.53}) \right)^2.
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

Аналогично имаме (Velinov et al., 2012a):

$$\begin{aligned}
 E_{42^*}(h) &= \left(E_a^{0.77} - \frac{1185.8}{A} \tilde{h} + \frac{2.9}{Z^2} (200^{1.77} - E_a^{1.77}) + \right. \\
 &\left. + \frac{11.4}{Z^2} (850^{1.53} - 200^{1.53}) + \frac{620.84}{Z^2} (E_k - 850) \right)^{1.3},
 \end{aligned} \tag{4.31}$$

$$\begin{aligned}
 E_{52}(h) &= \left(200^{1.77} - \frac{408.87Z^2}{A} \tilde{h} + 3.93 (850^{1.53} - 200^{1.53}) + \right. \\
 &\left. + 214.07 (5000 - 850) + 704.95 (E_k^{0.877} - 5000^{0.877}) \right)^{0.56}.
 \end{aligned} \tag{4.32}$$

Съществуват две възможности за пресичане на 4 граници на интервали:

- енергията на навлизащата частица пресича горната граница на Интервал 1, горната граница на Интервал 2*, горната граница на Интервал 2 и горната граница на Интервал 3 - $E_{41}(h)$;

- кинетичната енергия на навлизащата частица пресича горната граница на 2^* , горната граница на Интервал 2, горната граница на Интервал 3 и горната граница на Интервал 4 - $E_{52^*}(h)$. Те имат вида:

$$E_{41}(h) = \left(0.15^{0.5} - \frac{1285}{A} \tilde{h} + 1.08 (E_a^{0.77} - 0.15^{0.77}) + \frac{3.14}{Z^2} (200^{1.77} - E_a^{1.77}) + \frac{12.35}{Z^2} (850^{1.53} - 200^{1.53}) + \frac{672.77}{Z^2} (E_k - 850) \right)^2. \quad (4.33)$$

$$E_{52^*}(h) = \left(E_a^{0.77} - \frac{1185.8}{A} \tilde{h} + \frac{2.9}{Z^2} (200^{1.77} - E_a^{1.77}) + \frac{11.4}{Z^2} (850^{1.53} - 200^{1.53}) + \frac{620.84}{Z^2} (5000 - 850) + \frac{2044.48}{Z^2} (E_k^{0.877} - 5000^{0.877}) \right)^{1.3}. \quad (4.34)$$

Съществува една възможност при която кинетичната енергия пресича всички горни граници на интервали - $E_{51}(h)$:

$$E_{51}(h) = \left(0.15^{0.5} - \frac{1285}{A} \tilde{h} + 1.08 (E_a^{0.77} - 0.15^{0.77}) + \frac{3.14}{Z^2} (200^{1.77} - E_a^{1.77}) + \frac{12.35}{Z^2} (850^{1.53} - 200^{1.53}) + \frac{672.77}{Z^2} (5000 - 850) + \frac{2215.52}{Z^2} (E_k^{0.877} - 5000^{0.877}) \right)^2. \quad (4.35)$$

Следващата стъпка е да се пресметнат енергиите на безкрайност на отделните граници на интервали. В зависимост от това в кой интервал е началната енергия на частицата преди тя да навлезне в атмосферата, са възможни различни случаи за отделните граници. За границата от 0.15 MeV са възможни 5 случая за енергията ѝ на безкрайност:

- енергията на безкрайност е в Интервал 2^* , тогава тя се дава с $E_{0.15,2^*}$;
- енергията на безкрайност е в Интервал 2 - $E_{0.15,2}$;
- енергията на безкрайност е в Интервал 3 - $E_{0.15,3}$;
- енергията на безкрайност е в Интервал 4 - $E_{0.15,4}$;
- енергията на безкрайност е в Интервал 5 - $E_{0.15,5}$.

За първия случай имаме (Velinov et al., 2012a):

$$\tilde{h} = \tilde{h}_2^* = \frac{A}{1540} \int_{0.15}^{E_{0.15,2^*}} \frac{dE}{E^{0.23}} = \frac{A}{1185.8} (E_{0.15,2^*}^{0.77} - 0.15^{0.77}) \Rightarrow \quad (4.36)$$

$$E_{0.15,2^*}(h) = \left(0.15^{0.77} + \frac{1185.8}{A} \tilde{h} \right)^{1.3}. \quad (4.37)$$

Останалите изброени случаи се изразяват като:

$$E_{0.15,2}(h) = \left(E_a^{1.77} + \frac{408.87Z^2}{A} \tilde{h} - 0.34Z^2 (E_a^{0.77} - 0.15^{0.77}) \right)^{0.56}, \quad (4.38)$$

$$E_{0.15,3}(h) = \left(200^{1.53} + \frac{104.04Z^2}{A} \tilde{h} - 0.09Z^2 (E_a^{0.77} - 0.15^{0.77}) - 0.25 (200^{1.77} - E_a^{1.77}) \right)^{0.65}, \quad (4.39)$$

$$E_{0.15,4}(h) = 850 + \frac{1.91Z^2}{A} \tilde{h} - 0.002Z^2 (E_a^{0.77} - 0.15^{0.77}) - 0.005 (200^{1.77} - E_a^{1.77}) - 0.018 (850^{1.53} - 200^{1.53}), \quad (4.40)$$

$$E_{0.15,5}(h) = \left(5000^{0.877} + \frac{0.58Z^2}{A} \tilde{h} - 0.0005Z^2 (E_a^{0.77} - 0.15^{0.77}) - 0.001 (200^{1.77} - E_a^{1.77}) - 0.006 (850^{1.53} - 200^{1.53}) - 0.303 (5000 - 850) \right)^{1.14}. \quad (4.41)$$

Границата E_a се характеризира с четири възможни стойности за енергията ѝ на безкрайност, в зависимост от това в кой интервал се намира тази енергия, а именно (Velinov et al., 2012a):

$$E_{a,2}(h) = \left(E_a^{1.77} + \frac{408.87Z^2}{A} \tilde{h} \right)^{0.56}. \quad (4.42)$$

$$E_{a,3}(h) = \left(200^{1.53} + \frac{104.04Z^2}{A} \tilde{h} - 0.25 (200^{1.77} - E_a^{1.77}) \right)^{0.65}. \quad (4.43)$$

$$E_{a,4}(h) = 850 + \frac{1.91Z^2}{A} \tilde{h} - 0.005 (200^{1.77} - E_a^{1.77}) - 0.018 (850^{1.53} - 200^{1.53}). \quad (4.44)$$

$$E_{a,5}(h) = \left(5000^{0.877} + \frac{0.58Z^2}{A} \tilde{h} - 0.001 (200^{1.77} - E_a^{1.77}) - 0.006 (850^{1.53} - 200^{1.53}) - 0.303 (5000 - 850) \right)^{1.14}. \quad (4.45)$$

Границата от 200 MeV се характеризира с три възможни случая за енергията ѝ на безкрайност - $E_{200,3}$, $E_{200,4}$ и $E_{200,5}$ (Velinov et al., 2012a):

$$E_{200,3}(h) = \left(200^{1.53} + \frac{104.04Z^2}{A} \tilde{h} \right)^{0.65}. \quad (4.46)$$

$$E_{200,4}(h) = 850 + \frac{1.91Z^2}{A} \tilde{h} - 0.018 (850^{1.53} - 200^{1.53}). \quad (4.47)$$

$$E_{200,5}(h) = \left(5000^{0.877} + \frac{0.58Z^2}{A} \tilde{h} - 0.006 (850^{1.53} - 200^{1.53}) - 0.303 (5000 - 850) \right)^{1.14}. \quad (4.48)$$

Двете възможни случая за енергията на безкрайност на границата от 850 MeV са $E_{850,4}$ и $E_{850,5}$. За тях имаме (Velinov et al., 2012a):

$$E_{850,4}(h) = 850 + \frac{1.91Z^2}{A} \tilde{h}. \quad (4.49)$$

$$E_{850,5}(h) = \left(5000^{0.877} + \frac{0.58Z^2}{A} \tilde{h} - 0.303(5000 - 850) \right)^{1.14}. \quad (4.50)$$

Последната граница от 5000 MeV има една единствена възможност за енергията си на безкрайност, тогава когато тя е в Интервал 5 (Velinov et al., 2012a):

$$E_{5000,4}(h) = \left(5000^{0.877} + \frac{0.58Z^2}{A} \tilde{h} \right)^{1.14}. \quad (4.51)$$

От направените изчисления за енергийте на безкрайност на отделните граници на интервали (уравнения (4.37), (4.38), (4.39), (4.40), (4.41), (4.42), (4.43), (4.44), (4.45), (4.46), (4.47), (4.48), (4.49), (4.50) и (4.51)) може да запишем следните връзки:

$$E_{0.15,2}(h) < E_{a,2}(h). \quad (4.52)$$

$$E_{0.15,3}(h) < E_{a,3}(h) < E_{200,3}(h). \quad (4.53)$$

$$E_{0.15,4}(h) < E_{a,4}(h) < E_{200,4}(h) < E_{850,4}(h). \quad (4.54)$$

$$E_{0.15,5}(h) < E_{a,5}(h) < E_{200,5}(h) < E_{850,5}(h) < E_{5000,5}(h). \quad (4.55)$$

Чрез така представените изрази за законите за йонизационни загуби, атмосферните прагове на отрязване и границите на безкрайност на отделните интервали, може да изразим явния вид на модела за пресмятане на електронна продукция вследствие на преминаване на поток от заредени частици със заряд $Z > 1$ през атмосферата на Земята. Изводът ще се отнася за пет-интервална апроксимация на функцията за йонизационни загуби на Бор, Бете и Блох. В зависимост от големината на ефективния праг на отрязване E_{eff} , както и на големината на енергийте на безкрайност за отделните граници на интервали са възможни няколко основни случая, които подробно са разгледани в дисертацията. Тук е показан общият когато енергията на ефективния праг на отрязване е по-малка от горната границата на Интервал 1: $kT < E_{eff} < 0.15 < E_{0.15,2^*} < E_a < E_{a,2} < 200 < E_{200,3} < 850 < E_{850,4} < 5000 < E_{5000,5} < \infty$ (Velinov et al., 2012a, 2011b):

$$\begin{aligned} q(h) = & \frac{\rho(h)}{Q} \left(\int_{E_{eff}}^{0.15} D(E) \left(\frac{dE}{dh} \right)_1 dE_k + \int_{0.15}^{E_{0.15,2^*(h)}} D(E) \left(\frac{dE}{dh} \right)_{2^*1} dE_k + \right. \\ & + \int_{E_{0.15,2^*(h)}}^{E_a} D(E) \left(\frac{dE}{dh} \right)_{2^*} dE_k + \int_{E_a}^{E_{a,2}(h)} D(E) \left(\frac{dE}{dh} \right)_{22^*} dE_k + \\ & + \int_{E_{a,2}}^{200} D(E) \left(\frac{dE}{dh} \right)_2 dE_k + \int_{200}^{E_{200,3}(h)} D(E) \left(\frac{dE}{dh} \right)_{32} dE_k + \\ & + \int_{E_{200,3}(h)}^{850} D(E) \left(\frac{dE}{dh} \right)_3 dE_k + \int_{850}^{E_{850,4}} D(E) \left(\frac{dE}{dh} \right)_{43} dE_k + \\ & + \int_{E_{850,4}}^{5000} D(E) \left(\frac{dE}{dh} \right)_4 dE_k + \int_{5000}^{E_{5000,5}} D(E) \left(\frac{dE}{dh} \right)_{54} dE_k + \\ & \left. + \int_{E_{5000,5}}^{\infty} D(E) \left(\frac{dE}{dh} \right)_5 dE_k \right) = \end{aligned}$$

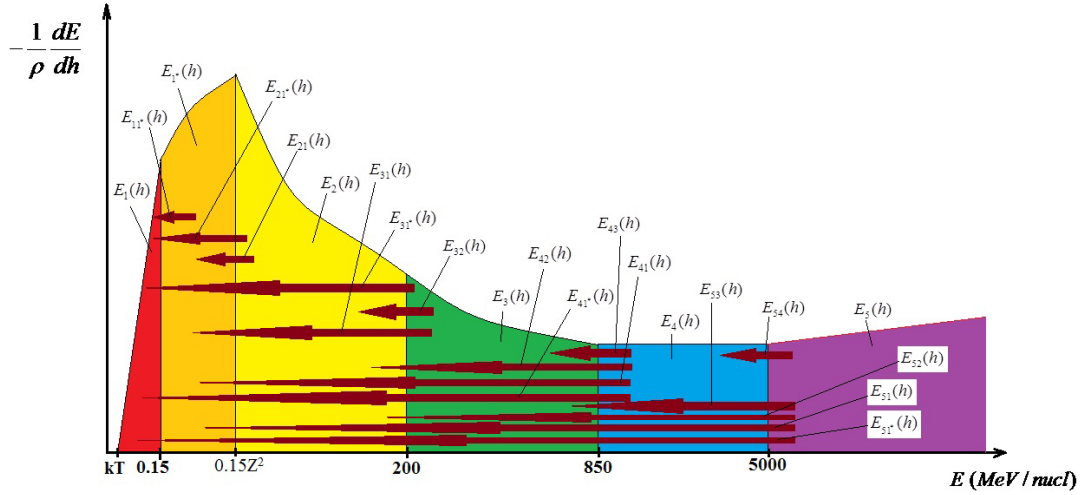
$$\begin{aligned}
&= \frac{2570\rho(h)}{Q} \int_{E_{eff}}^{0.15} D(E) \left(E_k^{0.5} - \frac{1285}{A} \tilde{h} \right) dE_k + \\
&+ \frac{2570\rho(h)}{Q} \int_{0.15}^{E_{0.15,2^*}} D(E) \left(0.15^{0.77} - \frac{1285}{A} \tilde{h} + 1.08 (E_k^{0.77} - 0.15^{0.77}) \right) dE_k + \\
&+ \frac{1540\rho(h)}{Q} \int_{E_{0.15,2^*}}^{E_a} D(E) \left(E_k^{0.77} - \frac{1185.8}{A} \tilde{h} \right)^{0.3} dE_k + \\
&+ \frac{1540\rho(h)}{Q} \int_{E_a}^{E_{a,2}} D(E) \left(E_a^{0.77} - \frac{1185.8}{A} \tilde{h} + \frac{2.9}{Z^2} (E_k^{1.77} - E_a^{1.77}) \right)^{0.3} dE_k + \\
&+ \frac{231Z^2\rho(h)}{Q} \int_{E_{a,2}}^{200} D(E) \left(E_k^{1.77} - \frac{408.87Z^2}{A} \tilde{h} \right)^{-0.43} dE_k + \\
&+ \frac{231Z^2\rho(h)}{Q} \int_{200}^{E_{200,3}} D(E) \left(200^{1.77} - \frac{408.87Z^2}{A} \tilde{h} + 3.93 (E_k^{1.53} - 200^{1.53}) \right)^{-0.43} dE_k + \\
&+ \frac{68Z^2\rho(h)}{Q} \int_{E_{200,3}}^{850} D(E) \left(E_k^{1.53} - \frac{104.04Z^2}{A} \tilde{h} \right)^{-0.34} dE_k + \\
&+ \frac{68Z^2\rho(h)}{Q} \int_{850}^{E_{850,4}} D(E) \left(850^{1.53} - \frac{104.04Z^2}{A} \tilde{h} + 54.47 (E_k - 850) \right)^{-0.34} dE_k + \\
&+ \frac{1.91Z^2\rho(h)}{Q} \int_{E_{850,4}}^{5000} D(E) dE_k + \\
&+ \frac{1.91Z^2\rho(h)}{Q} \int_{5000}^{E_{5000,5}} D(E) dE_k + \\
&+ \frac{0.66Z^2\rho(h)}{Q} \int_{E_{5000,5}}^{\infty} D(E) \left(E_k^{0.877} - \frac{0.58Z^2}{A} \tilde{h} \right)^{0.14} dE_k. \tag{4.56}
\end{aligned}$$

На Фигура 4.1 е показана схема на пет-интервалната апроксимация на функцията на йонизационните загуби в случая на йонизиращи частици със заряд $Z > 1$

5 Резултати и заключение

В предходната Глава 4, бе представена математическата обосновка на модела за пресмятане на електронна продукция вследствие на преминаване на поток от заредени космически частици през атмосферата на Земята. Настоящата глава съдържа основни резултати и заключения, направени на базата на този математически модел. Ще бъдат представени изчисления за електронната продукция $q(h)$ при различна апроксимация на функцията за йонизационни загуби dE/dh , както и тяхното сравнение с експериментални данни.

Както бе описано в Раздел 2.7, Usoskin et al. (2009) предлагат класификация на три



Фигура 4.1: Пет-интервална апроксимация на функцията на йонизационни загуби за йонизиращи частици със $Z > 1$. На фигурата са представени законите за енергетични загуби на отделните интервали ($E_1(h)$, $E_{2^*}(h)$, $E_2(h)$, $E_3(h)$, $E_4(h)$ и $E_5(h)$), както и законите за енергетични загуби в случаите когато кинетичната енергия на йонизиращите частици пресече една, две, три, четири или пет енергетични граници ($E_{2^*1}(h)$, $E_{22^*}(h)$, $E_{32}(h)$, $E_{43}(h)$, $E_{54}(h)$, $E_{21}(h)$, $E_{32^*}(h)$, $E_{42}(h)$, $E_{53}(h)$, $E_{31}(h)$, $E_{42^*}(h)$, $E_{52}(h)$, $E_{41}(h)$, $E_{52^*}(h)$ и $E_{51}(h)$).

групи от модели, които служат за изчисляване на електронна продукция в атмосферата вследствие на преминаване на поток от заредени космически частици: модели за йоносферата над 50 km височина (Thin Target Models); модели за озоносферата от 30 до 50 km надморска височина (Intermediate Target Models); модели за ниската атмосфера под 30 km надморска височина (Full Target Models). Според тази класификация, представеният модел влиза изцяло в класификацията на първите два типа модели.

5.1 Електронна продукция в атмосферата на Земята от галактически космически лъчи

Галактичните космически лъчи се характеризират със спектъра (Velinov, 1991; Velinov et al., 2013a):

$$D(E) = K(0.939 + E)^{-\gamma} \left(1 + \frac{\alpha}{E}\right)^{-\beta}, \quad (5.1)$$

където първият член $K(0.939 + E)^{-\gamma}$ характеризира потока на галактическите космически лъчи, а вторият член $(1 + \alpha/E)^{-\beta}$ - модулацията на галактическите космически лъчи от слънчевия вятър. Константата 0.939 е енергията на покой на протона. Параметрите K , α , β , γ се определят в зависимост от слънчевата активност и състава на потока галактически лъчи (различните групи от ядра - p, He, L, M, H, VH). Използваните параметри, определящи спектъра на ГКЛ съответно за минимална и максимална слънчева активност, са представени от Usoskin et al. (2005).

Последните развития на тези модели са дадени от Velinov and Mishev (2007); Velinov and

	К	α	β	γ
Протони	18.5	1.6399	0.7769	2.74
Хелиеви ядра	0.758	0.0649	1.718	2.77

Таблица 5.1: Стойности на коефициентите от спектъра на галактическите космически лъчи при минимална слънчева активност с модулационен потенциал $\Phi = 400$ MV (Usoskin et al., 2005). В таблицата са представени стойностите на коефициентите K , α , β и γ от уравнение (5.1) при минимална слънчева активност. Минимална слънчева активност се наблюдава през годините 1955, 1965, 1975, 1986, 1996, 2006 и т.н. По това време йонизацията, дължаща се на потока от ГКЛ в средната атмосфера и ниската йоносфера на Земята, е най-голяма.

	К	α	β	γ
Протони	18.5	7.24	1.16	2.74
Хелиеви ядра	0.499	0.9	1.09	2.77

Таблица 5.2: Стойности на коефициентите от спектъра на галактическите космически лъчи при максимална слънчева активност с модулационен потенциал $\Phi = 1200$ MV (Usoskin et al., 2005). В таблицата са представени стойностите на коефициентите K , α , β и γ от уравнение (5.1) при максимална слънчева активност, когато йонизацията, дължаща се на потока от ГКЛ в средната атмосфера и ниската йоносфера на Земята, е най-малка.

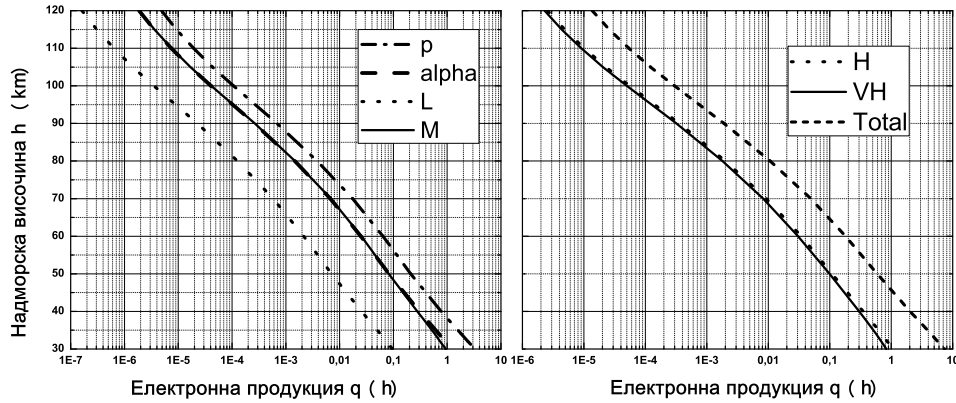
Mateev (2007b, 2008a,b); Velinov et al. (2009). Тъй като явният вид на модела представлява сума от определени интегрални, описващи отделни части от функцията за йонизационни загуби, при пресмятането може да бъдат използвани числени методи.

Един следващ етап в развитието на тези модели е моделът CORIMIA. През 2011 г. бяха публикувани първи резултати от изчисление на електронната продукция в средната атмосфера и ниската йоносфера вследствие на преминаване на поток от ГКЛ, симулирани с програмен код на платформата Mathematica (Velinov et al., 2011a). Височинният интервал, за който са направени пресмятанията, е от 30 до 120 km височина (средната атмосфера и ниската йоносфера) при геомагнитен праг на отрязване $R_c=0$ GV (района на геомагнитния полюс). В Таблица 5.3 и Фигура 5.1 са представени резултатите от пресмятането на електронната продукция. Спектърът на ГКЛ е за минимална слънчева активност (използвани са параметрите от Таблица 5.1). От получените резултати се вижда, че скоростта на образуване на свободни електрони в средната атмосфера и ниската йоносфера е пропорционална на квадрата на заряда на йонизиращите частици (Z^2), интензитета на потока за различните енергии на ГКЛ, както и на неутралната плътност на атмосферата на съответната височина. Вариациите на атмосферните прагове на отрязване също влияе върху получените резултати. Експерименталните данни до голяма степен потвърждават получените резултати от представения модел CORIMIA.

В първия случай приносът на Интервал 1* (сумата от стойностите в колони 2 и 3 на Таблица 5.4) към пълната електронна продукция намалява с височина. Във втория случай (колона 4) приносът е незначителен. Важно е да се отбележи, че приносът на междинния (свързващ интервал) - 600 – E_{600} варира значително с промяна на височината, като на по-ниски височини този принос достига почти 30%.

h km	$q(p)$ $cm^{-3}.s^{-1}$	$q(He)$ $cm^{-3}.s^{-1}$	$q(L)$ $cm^{-3}.s^{-1}$	$q(M)$ $cm^{-3}.s^{-1}$	$q(H)$ $cm^{-3}.s^{-1}$	$q(VH)$ $cm^{-3}.s^{-1}$	$q(\text{total})$ $cm^{-3}.s^{-1}$
120	4.89E-06	1.87E-06	1.66E-07	1.90E-06	2.57E-06	2.29E-06	1.37E-05
110	1.93E-05	7.40E-06	6.39E-07	7.52E-06	1.02E-05	9.08E-06	5.41E-05
100	1.06E-04	4.06E-05	3.51E-06	4.13E-05	5.57E-05	4.98E-05	2.97E-04
90	6.81E-04	2.61E-04	2.25E-05	2.65E-04	3.58E-04	3.20E-04	1.91E-03
80	3.80E-03	1.46E-03	1.26E-04	1.48E-03	2.00E-03	1.79E-03	1.07E-02
70	1.76E-02	6.75E-03	5.84E-04	6.91E-03	9.31E-03	8.27E-03	4.94E-02
60	6.42E-02	2.49E-02	2.16E-03	2.55E-02	3.46E-02	3.05E-02	1.82E-01
50	2.11E-01	8.26E-02	7.11E-03	8.22E-02	1.09E-01	9.96E-02	5.91E-01
40	7.75E-01	3.04E-01	2.55E-02	2.78E-01	3.49E-01	3.01E-01	2.03E+00
34	1.83E+00	9.26E-01	7.42E-02	7.43E-01	8.67E-01	6.90E-01	5.74E+00
30	3.27E+00	1.22E+00	9.62E-02	9.37E-01	1.07E+00	8.36E+00	7.44E+00

Таблица 5.3: Електронна продукция от потока ГКЛ по време на минимална слънчева активност при геомагнитен праг на отрязване $R_c = 0$ GV (Velinov et al., 2011a). В таблицата са представени основните резултати за електронната продукция $q(h)$ в $cm^{-3}.s^{-1}$, определени за ниската йоносфера и средната атмосфера (30 - 120 km) при преминаване на поток от ГКЛ. В първа колона е представена надморската височина. От втора до шеста колона са дадени приносите на отделните групи от ГКЛ. В последната колона е представена пълната електронна продукция от ГКЛ.



Фигура 5.1: Електронна продукция от ГКЛ по време на минимална слънчева активност при геомагнитен праг на отрязване $R_c = 0$ GV (Velinov et al., 2011a, 2013a). - На фигурата са представени профилите на електронната продукция $q(h)$ при преминаване на поток от ГКЛ през средната атмосфера и ниската йоносфера по време на минимална слънчева активност с модулационен потенциал $\Phi = 400$ MV. Профилите са разделени по групи ядра (протони - p ($Z = 1$), алфа частици - α ($Z = 2$), леки ядра - L ($3 \leq Z \leq 5$), средни ядра - M ($6 \leq Z \leq 6$), тежки ядра - H ($10 \leq Z \leq 19$), много тежки ядра - VH ($20 \leq Z$)) от потока на ГКЛ. Получените резултати са за височинния диапазон от 30 до 120 km. Пресмятанятия са направени с алгоритъм на Mathematica и са в случая на дву-интервална апроксимация на функцията за йонизационни загуби dE/dh .

h km	$E_{A1} - E_a$	$E_a - E_{a\infty}$	$E_{A2} - E_{a\infty}$	$E_{a\infty} - 600$	$600 - E_{600}$	$E_{600} - 10^5$
90	11.87	0.04	-	50.43	0.001	37.66
80	11.82	0.23	-	50.31	0.01	37.63
70	11.60	1.15	-	49.71	0.05	37.49
60	10.65	4.57	-	47.53	0.22	37.03
50	5.88	13.71	-	42.74	0.81	36.86
40	-	-	0.03	44.28	4.21	51.48
35	-	-	0.03	33.64	9.85	56.49
30	-	-	0.02	9.10	28.82	62.07

Таблица 5.4: Приносът на отделните енергетични интервали в проценти за пълната електронна продукция при дву-интервална апроксимация на функцията за йонизационни загуби в случая на йонизиращи частици от групата на VH (Velinov et al., 2013a). В таблицата са представени процентните приноси на отделните енергетични интервали за пълната електронна продукция във височинния интервал от 30 до 90 km. Пресмятанията са направени за йонизиращи частици от групата на VH. В първата колона е представена надморската височина. Втората и третата колона показват процентния принос на интервала на намаление на заряда в случая, когато атмосферният праг е E_{A1} . Четвъртата колона е процентният принос на интервала на намаление на заряда в случая, когато атмосферният праг на отрязване е E_{A2} . Петата и шестата колона отразяват процентния принос на Интервал 1. Последната колона е процентния принос на Интервал 2.

$E_A(h)$	p	α	L	M	H	VH
$E_A(90)$	0.90	1.03	0.39	0.28	0.22	0.19
$E_A(80)$	2.44	2.51	2.10	1.12	0.65	0.38
$E_A(70)$	6.17	6.20	9.01	7.52	3.75	1.67
$E_A(60)$	13.99	14.02	19.69	33.05	23.18	9.48
$E_A(50)$	29.01	29.01	40.44	65.32	95.26	49.70
$E_A(40)$	59.55	59.56	82.82	132.24	185.26	275.58
$E_A(35)$	87.70	87.70	121.90	194.22	269.80	385.70
$E_A(30)$	131.96	131.96	183.37	291.79	403.51	563.86

Таблица 5.5: Атмосферни прагове на отрязване $E_A(h)$ в MeV за различните групи ядра от потока на ГКЛ и за различна надморската височина h (Velinov et al., 2013a). В таблицата са представени атмосферните прагове във височинния интервал от 30 до 90 km за различните групи ядра от потока на ГКЛ.

Следващи резултати от изчислението на електронната продукция в случая на дву-интервална апроксимация на функцията на йонизационни загуби са представени в Velinov et al. (2013a). В Таблица 5.5 са изразени стойностите на атмосферния праг на отрязване $E_A(h)$ за различни височини (от 30 до 90 km надморска височина) и за различните групи от ядра на ГКЛ. При изчислението са използвани по един елемент от всяка група: берилий $Be(Z = 4)$ за групата на леките ядра L; кислород $O(Z = 8)$ за групата на средните ядра M; силиций $Si(Z = 14)$ за групата на тежките ядра H; желязо $Fe(Z = 26)$ за групата на много тежките ядра VH. Чрез тези стойности ще бъде определен ефективният праг E_{eff} . От представените резултати за $E_A(h)$ се вижда, че съществува зависимост между големината на атмосферния праг и заряда на частиците от различните групи ядра.

Освен резултатите представени за геомагнитен праг $R_c = 0$ GV, бяха представени и резултати за електронната продукция при различни геомагнитни прагове (за различни геомагнитни ширини). В Таблица 5.6 и Фигура 5.2 са изразени резултатите от изчисляването на пълната електронна продукция $q(h, \lambda_m)$ в зависимост от различни височини и геомагнитни ширини. Получените резултати са в добро съответствие с експерименталните данни особено под 70 km (Velinov et al., 1974; Velinov and Mateev, 2008a,b; Rosenberg and Lanzerotti, 1979; Brasseur and Solomon, 2005; Dorman, 2004, 2009; Velinov et al., 2009).

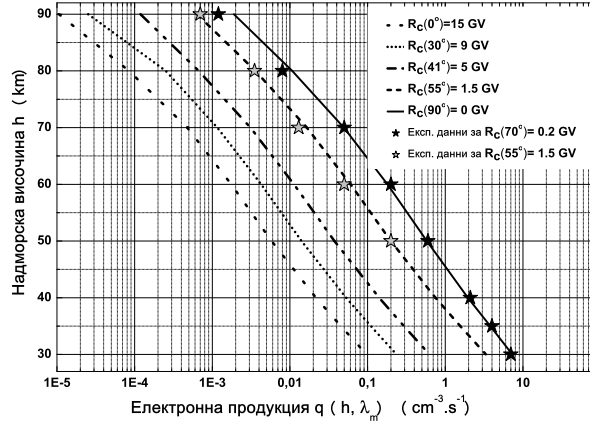
Под 70 km надморска височина, профилите на електронната продукция са определят предимно от атмосферните прагове (Таблица 5.5), където количеството преминало вещество \tilde{h} започва да става значително.

h km	$R_c(0^\circ) = 15$ GV	$R_c(30^\circ) = 9$ GV	$R_c(41^\circ) = 5$ GV	$R_c(55^\circ) = 1.5$ GV	$R_c(90^\circ) = 0$ GV
90	1.06E-05	2.52E-05	1.19E-04	6.34E-04	1.90E-03
80	8.47E-05	2.52E-04	6.69E-04	3.59E-03	1.07E-02
70	4.76E-04	1.16E-03	3.10E-03	1.65E-02	4.94E-02
60	1.76E-03	4.27E-03	1.13E-02	6.04E-02	1.81E-01
50	5.79E-03	1.41E-02	3.74E-02	1.99E-01	5.81E-01
40	2.17E-02	5.29E-02	1.41E-01	7.48E-01	1.96E+00
35	4.53E-02	1.10E-01	2.93E-01	1.56E+00	3.80E+00
30	9.71E-02	2.36E-01	6.28E-01	3.34E+00	7.31E+00

Таблица 5.6: Пълна електронна продукция $q(h, \lambda_m)$ в зависимост от различни надморски височини и различни геомагнитни ширини (Velinov et al., 2013a). В таблицата е представена пълната електронна продукция $q(h, \lambda_m)$ за различни височини (от 30 до 90 km) и геомагнитни ширини (за $\lambda_m = 0^\circ, 30^\circ, 41^\circ, 55^\circ, 90^\circ$). Пресмятанията са направени за минимална слънчева активност с модуляционен параметър $\Phi = 400$ MV.

5.1.1 Електронна продукция при пет-интервална апроксимация

Първи резултати при пресмятането на електронна продукция вследствие на преминаване на поток от ГКЛ през атмосферата на Земята в случая на пет-интервална апроксимация на функцията на Бор, Бете и Блох бяха публикувани от Velinov et al. (2011b, 2012a) посредством модела CORIMIA. Резултатите са получени чрез симулация с код, написан на платформата Mathematica (Wolfram Research, 2008) и са представени в Таблица 5.7. Чрез



Фигура 5.2: Пълната електронна продукция $q(h, \lambda_m)$ от ГКЛ по време на минимална слънчева активност за различни геомагнитни прагове на отрязване (Velinov et al., 2013a). На фигурата са представени профилите на електронната продукция $q(h, \lambda_m)$ от ГКЛ в средната атмосфера и ниската йоносфера при минимална слънчева активност с модулационен потенциал $\Phi = 400 \text{ MV}$. Профилите са пресметнати за различна геомагнитна ширина (за $\lambda_m = 0^\circ, 30^\circ, 41^\circ, 55^\circ, 90^\circ$). Получените резултати са за височинния диапазон от 30 до 90 km. На фигурата са нанесени експериментални данни за електронна продукция съответно за $\lambda_m = 55^\circ$ (Rosenberg and Lanzerotti, 1979) и за $\lambda_m = 70^\circ$ (Velinov et al., 1974; Velinov and Mateev, 2008a,b; Dorman, 2004, 2009).

различни цветове са показани и областите на въздействие (надморска височина) на различните атмосферни прагове за отделните групи ядра от потока на ГКЛ. На E_{A1} от уравнение (4.12) за случая на $Z > 1$ съответства син цвят; на E_{A2^*} от уравнение (4.13) за случая на $Z > 1$ съответства червен цвят; на E_{A2} от уравнение (4.14) съответства зелен цвят; на E_{A3} от уравнение (4.15) съответства лилав цвят.

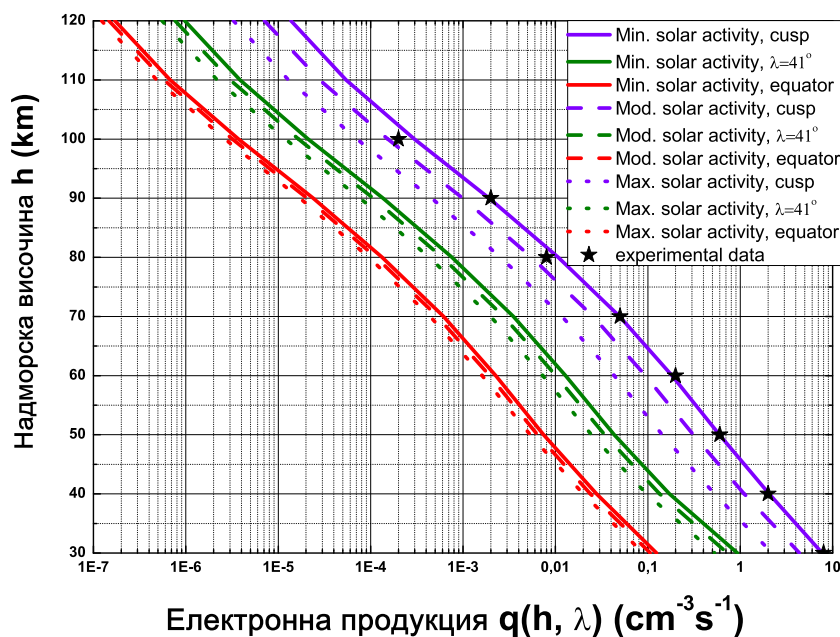
Скоростта на образуване на свободни електрони и йони в атмосферата на Земята вследствие на преминаване на потоци от ГКЛ зависи от нивото на слънчева активност. Чрез програмата CORIMIA могат да бъдат изчислени електронните профили за различна слънчева активност (Фигура 5.3).

Освен изчисляването по надморска височина на електронната продукция, моделът CORIMIA е пригоден за пресмятане на $q(h, \lambda)$ за различни геомагнитни ширини λ . На Фигура 5.4 са представени профилите на електронната продукция при преминаване на поток от протони през земната атмосфера $q_p(h, \lambda)$ в зависимост от геомагнитната ширина λ . Кривите са за пет различни надморски височини ($h = 30, 50, 70, 120 \text{ km}$). Тези резултати подобряват предишните 3D изчисления на Velinov and Mateev (1993); Velinov et al. (2005a).

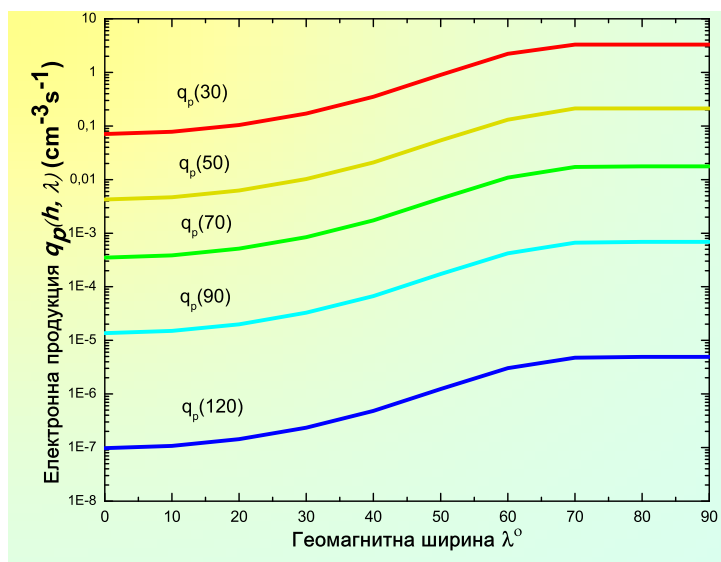
5.1.2 Анализ на резултатите за електронната продукция от ГКЛ в атмосферата

ГКЛ се нареждат сред основните и най-съществени космически фактори, които въздействат върху възможните слънчево-земни връзки (De Jager, 2005; Velinov, 1966a, 1968a, 2006; Velinov et al., 2009).

ГКЛ имат значение при моделирането на електрическите параметри и химическите процеси в атмосферата (Velinov et al., 1984; Velinov and Mateev, 1990b; Mateev and Velinov, 1992; Velinov and Tonev, 1994, 1995a,b; Tassev et al., 2003; Tassev, 2008).



Фигура 5.3: Електронна продукция $q(h, \lambda)$ по време на минимална, средна и максимална слънчева активност за различни геомагнитни ширини (Velinov et al., 2013c). На фигурата са представени профилите на електронната продукция $q(h, \lambda)$ при преминаване на потоци от ГКЛ по време на минимална, средна и максимална слънчева активност за за районите на полюсите, средни ширини ($\lambda = 41^\circ$) и еkvатора. Получените резултати са за височинния диапазон от 30 до 120 km надморска височина. Резултати са в добро съответствие с експерименталните данни (Brasseur and Solomon, 2005).



Фигура 5.4: Електронна продукция $q_p(h, \lambda)$ в зависимост от геомагнитната ширина λ . На фигурата са представени профилите на електронната продукция при преминаване на поток от протони през земната атмосфера $q_p(h, \lambda)$ в зависимост от геомагнитната ширина λ за различни надморски височини ($h = 30, 50, 70, 120$ km височина).

5.1 Електронна продукция в атмосферата на Земята от галактически космически лъчи

h km	$q(p)$ $cm^{-3}.s^{-1}$	$q(He)$ $cm^{-3}.s^{-1}$	$q(L)$ (Z=4) $cm^{-3}.s^{-1}$	$q(M)$ (Z=8) $cm^{-3}.s^{-1}$	$q(H)$ (Z=14) $cm^{-3}.s^{-1}$	$q(VH)$ (Z=26) $cm^{-3}.s^{-1}$	$q_{total}(h)$ $cm^{-3}.s^{-1}$
120	4.72E-06	1.47E-06	1.54E-07	1.81E-06	2.44E-06	2.20E-06	1.31E-05
115	8.97E-06	3.39E-06	2.92E-07	3.44E-06	4.65E-06	4.18E-06	2.49E-05
110	1.87E-06	7.05E-06	6.09E-07	7.16E-06	9.68E-06	8.70E-06	5.19E-05
105	4.19E-05	1.58E-05	1.37E-06	1.61E-05	1.20E-05	1.95E-05	1.17E-04
100	1.02E-04	3.87E-05	3.34E-06	3.93E-05	5.30E-05	4.77E-05	2.84E-04
95	2.59E-04	9.78E-05	8.44E-06	9.94E-05	1.34E-04	1.21E-04	7.19E-04
90	6.57E-04	2.48E-04	2.10E-05	2.52E-04	3.41E-04	3.06E-04	1.83E-03
85	1.60E-03	6.09E-04	5.00E-05	6.19E-04	8.36E-04	7.51E-04	4.47E-03
80	3.70E-03	1.39E-03	1.20E-04	1.41E-04	1.91E-03	1.71E-03	1.01E-02
75	8.10E-03	3.05E-03	2.64E-04	3.12E-04	4.20E-03	3.77E-03	2.25E-02
70	1.70E-02	6.42E-03	5.56E-04	6.57E-03	8.86E-03	7.92E-03	4.72E-02
65	3.32E-02	1.26E-02	1.09E-03	1.29E-02	1.75E-02	1.56E-02	9.30E-02
60	6.20E-02	2.37E-02	2.05E-03	2.42E-02	3.29E-02	2.92E-02	1.74E-01
55	1.10E-01	4.30E-02	3.72E-03	4.37E-02	5.91E-02	5.30E-02	3.15E-01
50	2.20E-01	7.85E-02	6.77E-03	7.85E-02	1.05E-01	9.58E-02	5.68E-01
45	3.80E-01	1.47E-01	1.26E-02	1.43E-01	1.87E-01	1.71E-01	1.04E+00
40	7.50E-01	2.90E-01	2.45E-02	2.70E-01	3.44E-01	3.03E-01	1.98E+00
35	1.54E+00	5.88E-01	4.85E-02	5.15E-01	6.32E-01	5.22E-01	3.85E+00
30	3.20E+00	1.03E+00	9.50E-02	9.54E-01	1.09E+00	8.21E-01	7.19E+00

Таблица 5.7: Електронна продукция $q(h)$ ($cm^{-3}s^{-1}$) от потока ГКЛ по време на минимална слънчева активност и въздействието на различните атмосферни прагове върху отделните групи ядра (Velinov et al., 2012a). В таблицата са представени резултати за електронната продукция $q(h)$ в $cm^{-3}.s^{-1}$ за ниската йоносфера и средната атмосфера (30 - 120 km) при преминаване на поток от ГКЛ по време на минимална слънчева активност. Резултатите са получени за райони с геомагнитен праг на отрязване $R_c = 0$ GV (района на каспа). В първа колона е представена надморската височина. От втора до шеста колона са дадени приносите на отделните групи от ГКЛ. В последната колона е представена пълната електронна продукция от ГКЛ. Цветовете представяне отразява съответен атмосферен праг - E_{A1} от уравнение (4.12) за случая на $Z > 1$ съответства син цвят; на E_{A2^*} от уравнение (4.13) за случая на $Z > 1$ съответства червен цвят; на E_{A2} от уравнение (4.14) съответства зелен цвят; на E_{A3} от уравнение (4.15) съответства лилав цвят.

Velinov (2006) предлага хипотеза, обединяваща въздействието на космическите лъчи и слънчевата радиация върху електричните и химичните параметри на атмосферата. Тя се изразява във взаимното участие на двата фактора върху образуването на озоносферата и химическите процеси свързани с озона в атмосферата. Потока от ГКЛ "предава" на озоносферата, неговата модулация от слънчевия вятър. От друга страна озоносферата играе ключова роля в метеорологичните процеси (включително динамиката на облачната система) (Velinov and Tonev, 1994, 1995a,b; Tassev et al., 2003; Eroshenko et al., 2010).

Скоростта на образуване на електрони в атмосферата вследствие на преминаване на заредени космически частици от галактичен произход зависи от няколко фактора: интензитета на потока от ГКЛ (периода на слънчева активност), вида на йонизиращите частици (заряд Z и атомна маса A), плътността на атмосферата ρ , стойностите съответно на гео-

магнитния и атмосферния праг на отрязване. Множеството параметри, които участват при определянето на електронната продукция значително усложняват проблема. Представеният модел CORIMIA за пресмятане на електронната продукция, който се базира на интервална апроксимация на функцията на йонизационни загуби (Velinov, 1974; Velinov and Mateev, 2007b,c,d; Velinov et al., 2006a, 2008a,b,c) успешно обединява всички отбелязани параметри. Резултатите от представения модел са в добро съответствие с експерименталните данни за електронната продукция (Dorman, 2004) за височини над 30-35 km височина. Това е така поради факта, че над 35 km доминиращи са електромагнитните взаимодействия (Velinov and Mishev, 2007; Velinov et al., 2009), на които се основава моделът. Освен това използването на отделни енергетични интервали прави възможно детайлно анализиране на йонизационните процеси в зависимост от енергията на навлизащата частица. С въвеждането на интервала на намаление на заряда (Dorman, 2004) се покрива целия спектър на потока от заредени космически частици.

Както може да се види на Фигура 5.2, получените данни за електронна продукция са в добро съответствие с експерименталните данни. Това ни дава основание да използваме така представения модел за прогностичните цели на космическото време и да свържем неговите резултати с различни физични и химични процеси в атмосферата и йоносферата. Структурата на модела CORIMIA позволява да бъдат изчислени електронните профили за различна надморска височина, геомагнитна ширина, както и за различна слънчева активност. По този начин може да се получи пълна картина на йонизационните процеси, свързани с космическите лъчи като цяло.

Получените резултати от представения модел за изчисляване на електронната продукция доказват, че потока от галактични космически лъчи е съществен фактор върху йонизационното и химическото състояние на средната атмосфера и ниската йоносфера.

5.2 Електронна продукция в атмосферата от слънчеви космически лъчи

За разлика от галактическите, слънчевите космически лъчи (СКЛ) се характеризират с диференциален спектър, който варира за различните слънчеви събития. Диференциалният спектър на потоците от слънчеви лъчи почти винаги е различен. Нещо повече, диференциалният спектър на СКЛ за конкретно слънчево събитие варира изключително във времето (за няколко часа или дни интензитетът на потока се променя значително) (Velinov, 1968a,c, 1970, 1971; Velinov et al., 1974; Dorman, 2004).

Ето защо при определянето и анализирането на количеството образувани свободни електрони в атмосферата на Земята, вследствие на преминаване на поток СКЛ от дадено слънчево събитие, се налага използването на повече от един диференциален спектър за различни моменти от време. Благодарение на съвременните спътникови системи (спътниците GOES), можем сравнително бързо да получим диференциални спектри на поток от СКЛ и конкретно за разглеждания случай да пресметнем вероятната електронна продукция в средната атмосфера и ниската йоносфера. На Фигура 2.1 (Velinov et al., 2013b) са показани диференциалните спектри на две слънчеви събития - GLE 05 (Ground Level Enhancement)

на 23 февруари 1956 и GLE 69 на 20 януари 2005. За събитието GLE 69 са показани два спектъра съответно за 08:00UT и 23:00UT на 20 януари 2005, тоест разгледана е времевата еволюция на събитието. Спектрите са от експериментални данни, получени от спътниците GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites).

При изчисляване на електронната продукция вследствие на преминаване на поток от СКЛ, трябва да се има предвид факта, че слънчевите енергетични частици (основно протони със $Z=1$) имат значително по-малки кинетични енергии от галактическите космически лъчи (Фигура 2.1). При използване на модела CORIMIA, развит на базата на интервална апроксимация за оценка на електронната продукция от СКЛ, ефективни ще бъдат първите два или три интервала (енергии до 850 MeV).

5.2.1 Йонизационни профили по време на събитията GLE 05 и GLE 69

Диференциалният спектър за потока от СКЛ, причинен от събитието GLE 69 на 20 януари 2005 от 08:00UT има вида Velinov et al. (2013b,c):

$$D(E) = 1.55 \times 10^6 E^{-2.32}. \quad (5.2)$$

Диференциалният спектър от същото събитие с 15 часа разлика (23:00UT) е:

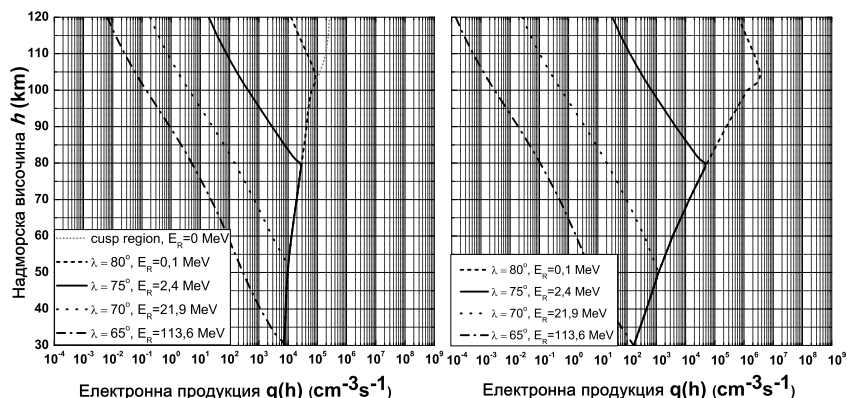
$$D(E) = 10^7 E^{-3.43}. \quad (5.3)$$

Диференциалният спектър на потока СКЛ от събитието GLE05 (Velinov, 1968a,c; Velinov et al., 1974; Velinov and Mateev, 2008a,b) е:

$$D(E) = 2.4 \times 10^{10} E^{-5}. \quad (5.4)$$

Така представените спектри могат да бъдат използвани като входящи параметри в модела за пресмятане на електронната продукция в средната атмосфера и ниската йоносфера в случая на преминаване на поток от СКЛ. Резултатите от това пресмятане са представени в Velinov et al. (2013b,c).

На Фигури 5.5 и 5.6 са показани профилите на електронната продукция за изследваните събития. Те характеризират региони с геомагнитни ширини $\lambda_m = 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ за събитието GLE 69 и $\lambda_m = 65^\circ, 70^\circ, 72^\circ, 75^\circ$ за събитието GLE 05. Всяка една от тези геомагнитни ширини се характеризира с различен геомагнитен праг на отрязване (Фигури 5.5 и 5.6). Височинният диапазон, за който са направени изчисленията, е от 30 до 120 km надморска височина. Разликата в диференциалните спектри на поток от СКЛ за различни моменти от време води съответно до интензивна промяна в електронната продукция за кратък период от време. Тази промяна изключително зависи от вида на спектъра (амплитуда и наклон (степенен показател)). Така например за по-ниски надморски височини, където атмосферният праг в повечето случаи доминира над геомагнитния праг на отрязване ($E_A > E_R$), по време на събитието GLE 69 спектър измерен в 08:00 UT поражда по-голяма електронна продукция в сравнение със спектър измерен в 23:00 UT. Това е поради наличието на слънчеви заредени частици с по-голяма кинетична енергия в потока със спектър



Фигура 5.5: Времевата еволюция на електронна продукция $q(h, \lambda)$ по време на слънчевото събитие GLE 69 за различни геомагнитни прагове на отрязване (Velinov et al., 2013b). На фигурата са представени профилите на електронната продукция $q(h, \lambda)$ при преминаване на поток от СКЛ породен от събитието GLE 69 през средната атмосфера и ниската йоносфера. Профилите са пресметнати за различна геомагнитна ширина ($\lambda = 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 90^\circ$). Получените резултати са за височинния диапазон от 30 до 120 km. надморска височина. Левият панел на фигурата показва електронната продукция за 08:00 UT, докато десният панел показва електронната продукция 15 часа по-късно - 23:00 UT.

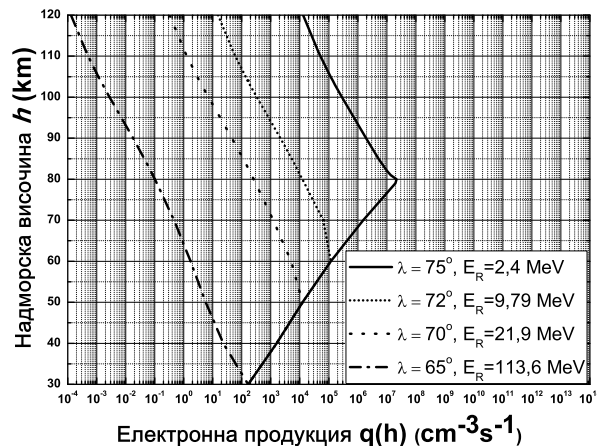
представен с уравнение (5.2) в сравнение със спектъра, измерен в по-късен етап (уравнение (5.3)). Видът на двата спектъра (Фигура (2.1)) е такъв, че за по-големи надморски височини (над 80 km. надморска височина) по-голямата електронна продукция е породена от спектъра, измерен в по-късния етап (23:00 UT).

На Фигура 5.6 са представени профилите на електронната продукция за различни геомагнитни ширини по време на най-мощното слънчево протонно събитие, което е наблюдавано от началото на космическите изследвания GLE 05.

5.2.2 Анализ на резултатите за йонизацията при преминаване на поток от СКЛ през атмосферата

При пресмятането на профилите на електронната продукция вследствие на преминаване на потоци от СКЛ през атмосферата на Земята, е използван моделът CORIMA, разработен на базата на пет-интервална апроксимация на функцията на йонизационни загуби на Бор, Бете и Блох. Значими при пресмятанятия са първите няколко интервала (до 850 MeV). Тъй като потоците от СКЛ са предимно съставени от протони ($Z=1$), при изчисленията е използван моделът без да се включва интервалът за намаление на заряда.

Спектърът на СКЛ, големината на атмосферния и геомагнитния праг, както и плътността на атмосферата, предполагат образуването на максимуми в профилите на електронната продукция. На Фигури 5.5 и 5.6 ясно се виждат изчислените максимуми, като за всеки конкретен случай вида и надморската височина на максимумите са различни. Вижда се, че с нарастване на геомагнитната ширина (намаляване на геомагнитния праг на отрязване) максимумите се изместват с височина. Когато атмосферният праг на отрязване



Фигура 5.6: Електронната продукция $q(h, \lambda)$ по време на слънчевото събитие GLE 05 за различни геомагнитни прагове на отрязване (Velinov et al., 2013b). На фигурата са представени профилите на електронната продукция $q(h, \lambda)$ при преминаване на поток от СКЛ, породен от най-мощното слънчево протонно събитие което е наблюдавано от началото на космическите изследвания - GLE 05, през средната атмосфера и ниската йоносфера. Профилите са пресметнати за различна геомагнитна ширина ($\lambda = 65^\circ, 70^\circ, 72^\circ, 75^\circ$). Получените резултати са за височинния диапазон от 30 до 120 km. надморска височина.

е по-голям от геомагнитния праг на отрязване, тогава се наблюдава нарастване на електронната продукция с нарастване на надморската височина. В самата точка на максимума имаме изравняване на големината на геомагнитния и атмосферния праг на отрязване. След тази точка електронната продукция започва да намалява с височина. Тогава определящ за ефективния праг на отрязване е геомагнитният праг.

Потокут от СКЛ поражда незначителна електронна продукция в области с по-малка геомагнитна ширина, където геомагнитния праг на отрязване е достатъчно голям. В тези области геомагнитното поле на Земята почти изцяло екранира потока на СКЛ.

Показаните количествени резултати за електронната продукция от СКЛ в атмосферата, доказват, че представеният модел CORIMIA може да бъде използван за оценката на ефектите от различни слънчеви протонни събития, тоест, за прогностичните цели на космическото време.

5.3 Електронна продукция вследствие проникване на аномални космически лъчи в полярната атмосфера

Въздействието на аномалните космически лъчи върху йонизационното и химическо състояние на средната атмосфера и ниската йоносфера все още предизвиква интерес, тъй като АКЛ са важен йонизационен фактор на полярната йоносфера и атмосфера (Velinov, 1991, 2004; Velinov and Mateev, 1992, 2005a; Ruder et al., 2004; Velinov et al., 2001). Напоследък бяха получени експериментални данни за диференциалния спектър на аномалните космически лъчи (Leske et al., 2011), чрез които могат да се направят количествени и качествени оценки на електронната продукция в атмосферата на Земята вследствие на преминаване на

поток от АКЛ. Една такава оценка бе направена чрез прилагането на модела CORIMIA за пресмятане на електронна продукция на базата на пет-интервална апроксимация на функцията за йонизационни загуби. Резултатите от съответните пресмятания са представени от Velinov et al. (2012b, 2013c).

5.3.1 Електронна продукция от основните компоненти на аномалните космически лъчи - протони, хелиеви и кислородни ядра

Основните елементи, които се съдържат в потока от АКЛ, са протони p , хелиеви ядра He^+ и кислородни ядра O^+ (Cummings et al., 1984). Спектри на тези елементи са представени на Фигура 2.1 (Velinov et al., 2013b).

Подобно на СКЛ и АКЛ имат значително по-ниски кинетични енергии от ГКЛ. Ето защо при прилагането на модела с пет-интервална апроксимация на функцията на йонизационни загуби, ефективни ще бъдат първите два интервала (енергии до 200 MeV). Отново поради сравнително ниските енергии, приноса на потока от АКЛ върху йонизационното състояние на атмосферата на Земята ще е значим около районите с по-малък ефективен праг на отрязване.

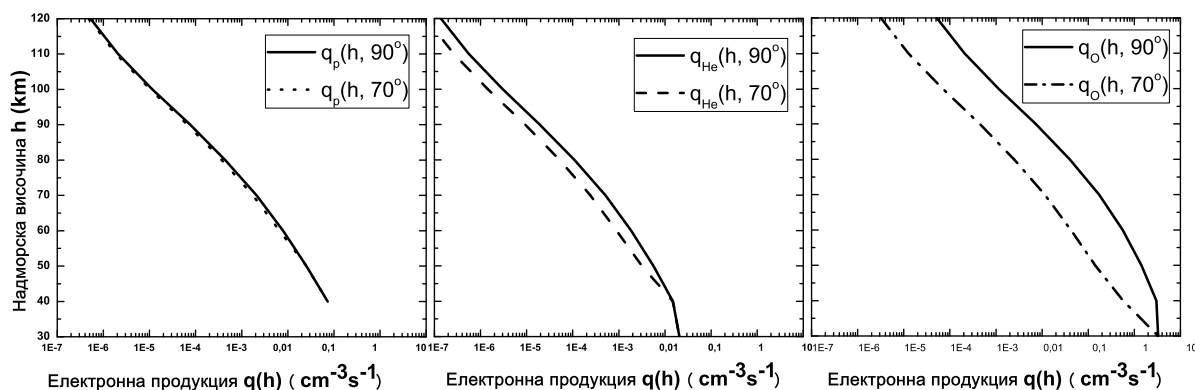
На Фигура 5.7 са представени резултати за електронната продукция $q(h, \lambda_m)$ в атмосферата на Земята при преминаване на различните елементи от потока АКЛ - левият панел представя резултати за протони p , средният панел - за еднократно йонизирани хелиеви ядра He^+ и десният панел - за еднократно йонизирани кислородни ядра O^+ . Изчисленията са направени съответно за геомагнитни ширини $\lambda_m = 90^\circ, 70^\circ$ с височинен интервал от 30 до 120 km. надморска височина (йоносферата и средната атмосфера). Стойностите на електронната продукция зависят изключително от диференциалния спектър на преминаващите заредени частици, което ясно се вижда на Фигура 5.7. Освен това лесно може да се види и въздействието на атмосферния и геомагнитния праг на отрязване за различните съставни частици на потока от АКЛ. Когато съставните елементи имат по-голям заряд се наблюдава по-голяма разлика в изчислените стойности на електронна продукция за конкретни надморски височини и геомагнитни ширини.

За изчисленията са използвани спътникови експериментални данни от Goddard Space Flight Center, NASA (2011); Leske et al. (2011).

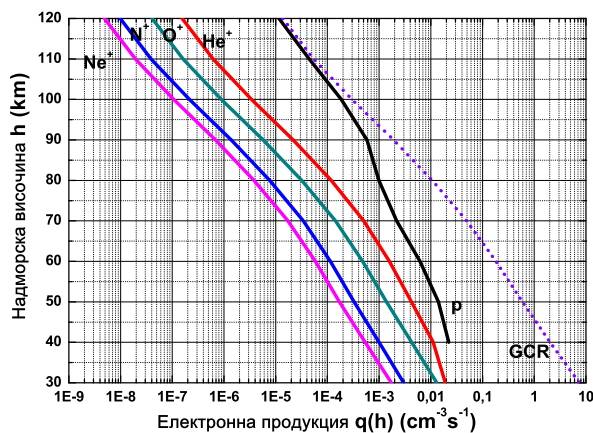
На Фигури 5.8 и 5.9 са представени електронните продукции $q(h, \lambda)$ вследствие на преминаване на различни компоненти от състава на АКЛ през атмосферата на Земята.

5.3.2 Интерпретация на резултатите за електронната продукция при преминаване на поток от АКЛ

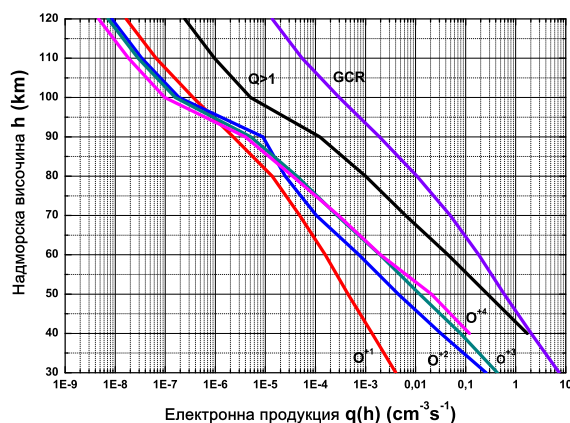
Електронната продукция $q(h, \lambda)$ вследствие на преминаване на различни компоненти от АКЛ през атмосферата на Земята оказва влияние върху пълната електронна продукция в райони с по-нисък ефективен праг на отрязване (райони с големи геомагнитни ширини и големи надморски височини). От всички компоненти в състава на АКЛ, най-голямо значение за йонизационното състояние на атмосферата оказват протоните (p), хелия (He^+) и кисо-



Фигура 5.7: Пълната електронна продукция $q(h, \lambda)$ по време на преминаване на АКЛ за геомагнитни ширини $\lambda_m = 90^\circ, 70^\circ$ (Velinov et al., 2012b). На фигурата са представени профилите на електронната продукция $q(h, \lambda)$ при преминаване на различните елементи от потока АКЛ - левият панел представя резултати за протони p, средният панел - за еднократно йонизирани хелиеви ядра He^+ и десният панел - за еднократно йонизирани кислородни ядра O^+ . Получените резултати са за височинния диапазон от 30 до 120 km. надморска височина.



Фигура 5.8: Електронната продукция $q(h, \lambda)$ при преминаване на поток от аномални космически лъчи (Asenovski et al., 2013). На фигурата са представени профилите на електронната продукция $q(h, \lambda)$ от основните компоненти на потока от АКЛ (протони (p) (Simpson, 1992), хелий (He^+), азот (N^+), кислород (O^+), неон (Ne^+) (Cummings et al., 1984)). Получените резултати са за височинния диапазон от 30 до 120 km. надморска височина.



Фигура 5.9: Електронната продукция $q(h, \lambda)$ при преминаване на еднократно и многократно йонизирани кислородни атоми от състава на аномалните космически лъчи (Asenovski et al., 2013). На фигурата са представени профилите на електронната продукция $q(h, \lambda)$ от еднократно (O^+) многократно (O^{+2} , O^{+3} , O^{+4}) йонизирани кислородни атоми от състава на аномалните космически лъчи (Mewaldt et al., 1996). Получените резултати са за височинния диапазон от 30 до 120 km. надморска височина.

рода (O^+) (Фигура 5.8). От друга страна от Фигура 5.9 се вижда как приноса на различно йонизираните компоненти на кислородния атом се променя по височина. При по-големи надморски височини йонизацията вследствие на еднократно и двукратно йонизирани кислородни атоми е доминираща, докато под 90 - 100 km височина доминиращи са приносите на многократно йонизираните атоми. Това е така поради вида на спектрите на различно йонизираните кислородни атоми.

Изчисленията за електронната продукция вследствие на преминаване на поток от АКЛ през атмосферата на Земята показват, че представеният модел CORIMIA е приложим към всички видове потоци от космически лъчи. Той успешно може да се прилага при различни диференциални спектри и съставни елементи, като по този начин могат да се правят количествени и качествени оценки на йонизационното състояние в различни области на земната атмосфера.

Въздействието на АКЛ върху йонизационното състояние на атмосферата е ограничено до районите с високи геомагнитни ширини ($\lambda > 60^\circ$), където геомагнитния праг на отрязване е сравнително малък и не екранира потока от АКЛ (Velinov et al., 2012b, 2013c).

5.4 Заключение. Приложение на получените резултати за слънчево-земната физика и за космическото време и климат. Бъдещо развитие на модела

Изчислените в 5.1.2, 5.2.1 и 5.3.1 йонизационни разпределения с помощта на операционния модел CORIMIA могат да послужат за едно ново и по-съвременно количествено определяне на:

- профили на електронната концентрация $N(h)$ в космическия слой C в ниската йоносфера (Velinov, 1966a, 1967, 1968a,b; Velinov et al., 1974), а оттук и отклоняващата и неотклоняващата абсорбция на радиовълните (Nestorov and Velinov, 1965; Velinov, 1965; Nestorov, 1969).

- електрическите проводимости в средната атмосфера и йоносферата (Velinov and Mateev, 1990b,c; Mateev and Velinov, 1992; Velinov and Tonev, 1994, 1995a,b).

- химическото състояние на средната атмосфера (Velinov et al., 1984) и в частност височинните разпределения (профили) на озона (Tassev et al., 2003; Tassev, 2008).

- радиационните въздействия в околземното космическо пространство (Velinov et al., 1974; Dorman, 2004).

- разпространението на радиовълните в широк честотен обхват (Nestorov and Velinov, 1965; Velinov, 1965; Nestorov, 1969; Velinov et al., 1974).

- йонизацията в атмосферите на други планети и техни спътници (Velinov, 1974; Velinov and Mateev, 1991a; Velinov et al., 2003, 2004; Ruder et al., 2004).

Бъдещото развитие на модела е свързано с отчитане на зависимостта от зенитния ъгъл на проникване на заредените космически частици и създаването на нов тримерен 3D йонизационен модел CORIMIA 3D.

Предстои да бъде въведена сферична функция на Чепмен (Velinov, 1968a; Velinov et al., 1974) при изчисляване на йонизационните профили в атмосферите на планетите от Земната група с приблизително сферична форма: Венера, Земя и Марс (Velinov and Mateev, 1991a; Velinov et al., 2001).

Йонизациите в атмосферите на планетите гиганти: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун ще бъдат изчислявани след въвеждането на елиптични функции на Чепмен поради тяхната форма на ротационни елипсоиди.

Библиография

- Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al., Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res., A: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment, 506 (3), 2003, 250-303. 5
- Asenovski S.N., Sun and Geosphere, 7, 2012, 1, pp 49-50.
- Asenovski S.N., Stoykova D., CP1121, Space Plasma Physics (Edited by I. Zhelyazkov), American Institute of Physics, 2009, pp.151-155.
- Asenovski S.N., Velinov P.I.Y., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 66, 2013, in press. 31, 32
- Bracewell R.N., Bain W.C., J. Atmosph. Terr. Phys., 2, 1952, 216. 4
- Brasseur G., Solomon S., Aeronomy of the Middle Atmosphere, Dordrecht, Springer, 2005. 22, 24
- Cummings A.C., Stone E.C., Webber W.R., Astrophysical Journal, 287, 1984, 99-103. 30, 31
- De Jager C., Space Sci. Rev., 120, 2005, 197. 23
- Desorgher L., et al., Int. J. Modern Phys., 2005, A 20 (29), 6802-6804. 5
- Dorman L., Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2004. 3, 6, 8, 22, 23, 26, 38
- Dorman L., Cosmic Rays in Magnetosphere of the Earth and other Planets, 2009, Springer. 22, 23
- Dorman L., Kozin I.D., Cosmic Radiation in the Upper Atmosphere, FIZMATGIZ, Moscow, 1983. 5
- Dorman L., Krupitskaya T.M., Cosmic Rays, Moscow, NAUKA, 15, 1975, 30-33. 5, 7
- Eroshenko E., et al., J. Adv. Space Res., 46, 2010, 637-641. 1, 25
- Goddard Space Flight Center, NASA, Anomalous cosmic ray hydrogen, <http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/features/bios/christian/anomalous.html> 30
- Heck D., et al., Forschungszentrum Karlsruhe Report FZKA 6019, 1998. 5
- Hess V.F., Phys. Ztschr, 13 (21-22), 1912, 1084-1091. 1
- Klecker B., Space Sci. Rev., 72, 1995, 419. 3
- Krasnushkin P.E., Nuovo Cimento, suppl., 26, 1962, 287. 4
- Leske R.A., et al., Space Sci. Rev., DOI 10.1007/s11214-011-9772-1. 3, 29, 30
- Mateev L., Velinov P.I.Y., J. Adv. Space Res., 12, 1992, 10, 353-356. 23
- Maxwell J.C., A Treatise on Electricity and Magnetism, Oxford: Clar. Press, 1873, V. 1, V. 2.
- Mewaldt R.A., Cosmic Rays, Macmillan Encyclopedia of Physics, 1996. 2
- Mewaldt R.A., et al., 29th Int. CR Conf. Pune, 2005, 101-104. 3
- Mewaldt R.A., et al., The Astrophysical Journal, 466, 1996, L43-L46. 32

- Mishev A., *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*, 72(16), 2010, 1195-1199. 5
- Moler W.F., *Geophys. Res.*, 65, 1960, 1459-1468. 5, 7
- Nestorov G., *C.R. Acad. bulg. Sci.*, 16, 1963, 357. 4
- Nestorov G., *Physics of the Lower Ionosphere*, BAS Publ. House, Sofia, 1969. 1, 4, 5
- Nestorov G., *Absorption and Morphology of the Lower Ionosphere*, BAS Publ. House, Sofia, 1986. 5
- Nestorov G., Velinov P.I.Y., *C.R. Acad. bulg. Sci.*, 18, 1965, 12, 1111-1114. 5, 7
- Nicolet M., Aikin A., *J. Geophys. Res.*, 65, 1960, 5, 1469-1483. 5, 7
- O'Brien K., *Il Nuovo Cimento A*, 3, No 4, 1971, 521-547. 5
- Rosenberg T. J., Lanzerotti L. J., In: *Middle Atmosphere Electrodynamics*, Maynard N. C. (ed.), NASA CP-2090, 1979, 43-70. 22, 23
- Ruder H., et al., *C.R. Acad. bulg. Sci.*, 57, 2004, 2, 41-46. 3, 29
- Serafimov K., *Physics of the Middle Ionosphere*, BAS Publ. House, Sofia, 1970. 4
- Simpson J.A., *Frontiers in Cosmic Physics*, vol. 655, *Ann. N. York Acad. Sci.*, 655, 1992, 95. 31
- Sternheimer R. M., Ch. 1 in *Fundamental Principles and Methods of Particle Detection, Methods of Experimental Physics*, vol.V, A. Nuclear Physics, Acad. Press, New York - London, 1961. 7, 8
- Tassev Y., *C.R. Acad. bulg. Sci.*, 61, 2008, 2, 243-252. 23
- Tassev Y., et al., *J. Adv. Space Res.*, 31, 2003, 9, 2163-2168. 6, 7, 23, 25
- Usoskin, I.G., et al., *J. Geophys. Res.*, 2005, 110(A12), A12108. 18, 19
- Usoskin I.G., et al., *Acta Geophys.*, 2009, 57, 88-101. 1, 5, 6, 7, 17, 38
- Van Allen J.A., Ch. 14 in *"Physics and Medicine of the Upper Atmosphere Univ. N. Mexico Press*, 1952. 5
- Velinov P.I.Y., *C.R. Acad. bulg. Sci.*, 18, 1965, 12, 1115-1118. 5, 7
- Velinov P.I.Y., *C.R. Acad. bulg. Sci.*, 19, 1966a, 2, 109-112. 1, 3, 5, 7, 8, 10, 23
- Velinov P.I.Y., *C.R. Acad. bulg. Sci.*, 20, 1967, 11, 1141-1144.
- Velinov P.I.Y., *J. Atmosph. Terr. Phys.* 30, 1968a, 11, 1891-1905. 1, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 23, 26, 27
- Velinov P.I.Y., *Geomagnetism and Aeronomy*, 8, 1968 b, 3, 448-456. 5
- Velinov P.I.Y., *Izvestia AN SSSR, phys.*, 32, 1968c, 11, 1906-1909. 3, 4, 5, 7, 26, 27
- Velinov P.I.Y., *Izvestia AN SSSR, phys.*, 32, 1968d, 11, 1910-1916. 5
- Velinov P.I.Y., *J. Atmos. Terr. Phys.*, 32, 1970, 139-147. 3, 5, 26
- Velinov P.I.Y., *J. Atmos. Terr. Phys.*, 33, 1971, 3, 429-436. 3, 5, 26
- Velinov P.I.Y., *J. Atmos. Terr. Phys.*, 36, 1974, 359-362. 3, 5, 26
- Velinov P.I.Y., *C.R. Acad. bulg. Sci.*, 44, 1991, 2, 33-36. 3, 5, 18, 29
- Velinov P.I.Y., *C.R. Acad. bulg. Sci.*, 57, 2004, 2, 53-56. 3, 29
- Velinov P.I.Y., *Sun and Geosphere*, 1, 2006, 1, 5-7. 23
- Velinov P.I.Y., Asenovski S., Kudela K., Lastovicka J., Mateev L., Mishev A, Tonev P., *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3, 2013c, A14, 01-17. 1, 24, 27, 30, 32
- Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L., *C.R. Acad. bulg. Sci.*, 64, 2011a, 9, 1303-1310. 1, 2, 19, 20
- Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L., *C.R. Acad. bulg. Sci.*, 65, 2012a, 8, 1135-1144. 1, 9,

- 11, 12, 13, 14, 15, 16, 22, 25
- Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 65, 2012b, 9, 1261-1268. 1, 30, 31, 32
- Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L., Acta Geophysica, 61, 2013a, 2, 494-509, DOI: 10.2478/s11600-012-0084-y. 1, 18, 20, 21, 22, 23
- Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 66, 2013b, 2, 235-242. 1, 2, 26, 27, 28, 29, 30
- Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L., Mishev A., Journal of Physics, Conference Series (JPCS), JOP (Institute of Physics), 2012c, 372, pp.1-4. 1
- Velinov P.I.Y., Buchvarova M., Mateev L., Ruder H., Adv. Space Res., 27, 2001, 11, 1901-1907. 29
- Velinov P.I.Y., Mateev L., J. Adv. Space Res., 10, 1990a, 10, 1053-1058. 8
- Velinov P.I.Y., Mateev L., Geomagnetism and Aeronomy, 30, 1990b, 4, 554-557. 8, 23
- Velinov P.I.Y., Mateev L., Geomagnetism and Aeronomy, 30, 1990c, 4, 593-598. 8
- Velinov P.I.Y., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 44, 1991a, 1, 31-34.
- Velinov P.I.Y., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 44, 1991b, 3, 61-64.
- Velinov P.I.Y., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 45, 1992, 2, 43-46. 3, 29
- Velinov P.I.Y., Mateev L., J. Adv. Space Res., 13, 1993, 1, 377-380. 23
- Velinov P.I.Y., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 58, 2005a, 3, 269-274. 3, 9, 29
- Velinov P.I.Y., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 58, 2005b, 5, 511-516. 9
- Velinov P.I.Y., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 58, 2005c, 12, 1399-1404. 9
- Velinov P.I.Y., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 59, 2006a, 10, 1001-1008. 9
- Velinov P.I.Y., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 59, 2006b, 12, 1247-1252. 9
- Velinov P.I.Y., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 60, 2007a, 1, 37-44. 9
- Velinov P.I.Y., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 60, 2007b, 2, 133-140. 1, 6, 9, 18, 26
- Velinov P.I.Y., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 60, 2007c, 6, 613-618. 9, 26
- Velinov P.I.Y., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 60, 2007d, 8, 839-844. 9, 26
- Velinov P.I.Y., Mateev L., Adv. Space Res., 42, 2008a, 1586-1592. 2, 6, 9, 19, 22, 23, 27, 38
- Velinov P.I.Y., Mateev L., J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 70, 2008b, 574-582. 2, 6, 9, 19, 22, 23, 27, 38
- Velinov P.I.Y., Mateev L., Kilifarska N., Annales Geophysicae, 23, 2005a, 9, 3043-3046. 1, 6, 9, 23, 38
- Velinov P.I.Y., Mateev L., Ruder H., C.R. Acad. bulg. Sci., 61, 2008a, 1, 133-146. 9, 10, 11, 12, 26
- Velinov P.I.Y., Mateev L., Ruder H., Aerospace Res. Bulg., 22, 2008b, 24-36. 9, 10, 11, 12, 26
- Velinov P.I.Y., Mateev L., Spassov Chr., 1996, J. Adv. Space Res., 18, 1996, 3, 23-27.
- Velinov P.I.Y., Mishev A., C.R. Acad. bulg. Sci., 60, 2007, 5, 495-502. 5, 7, 18, 26
- Velinov P.I.Y., Mishev A., Mateev L., J. Adv. Space Res., 44, 2009, 1002-1007. 1, 2, 5, 6, 7, 19, 22, 23, 26, 38
- Velinov P.I.Y., Mishev A., Asenovski S.N., Mateev L., Bulg. J. Phys., 38, 2011b, 264-273. 2, 16, 22

- Velinov P.I.Y., Nestorov G., C.R. Acad. bulg. Sci., 20, 1967, 4, 293-296. 4, 5
- Velinov P.I.Y., Nestorov G., Dorman L.I., Cosmic Ray Influence on the Ionosphere and on Radio-Wave Propagation, BAS Publ. House, Sofia, 1974. 1, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 22, 23, 26, 27
- Velinov P.I.Y., Ruder H., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 58, 2005b, 8, 897-902. 9
- Velinov P.I.Y., Ruder H., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 58, 2005d, 10, 1143-1150. 9
- Velinov P.I.Y., Ruder H., Mateev L.N., C.R. Acad. bulg. Sci., 59, 2006a, 7, 723-730. 1, 6, 9, 26
- Velinov P.I.Y., Ruder H., Mateev L., Aerospace Res. Bulg., 22, 2008c, 37-50. 9, 10, 11, 12, 26
- Velinov P.I.Y., Ruder H., Mateev L., Buchvarova M., Kostov V., C.R. Acad. bulg. Sci., 56, 2003, 5, 37. 8
- Velinov P.I.Y., Ruder H., Mateev L., Buchvarova M., Kostov V., Adv. Space Res., 33, 2004, 2, 227. 6, 8, 9, 38
- Velinov P.I.Y., Ruder H., Zellhuber U., Mateev L., C.R. Acad. bulg. Sci., 54, 2001, 9, 55-58. 3
- Velinov P.I.Y., Smirnova N.A., Vlasov V.A., J. Adv. Space Res., 4, 1984, 1, 123-130. 5, 23
- Velinov P.I.Y., Spassov C., Kolev S., J. Atmosph. Terr. Phys., 54, 1992, 10, 1347-1353. 1, 5
- Velinov P.I.Y., Tonev P., J. Atmosph. Terr. Phys., 56, 1994, 3, 349-359. 1, 5, 6, 7, 23, 25
- Velinov P.I.Y., Tonev P., J. Atmosph. Terr. Phys., 57, 1995a, 687. 1, 5, 6, 7, 23, 25
- Velinov P.I.Y., Tonev P., JGR 100, 1995b, D1, 1477. 1, 5, 6, 7, 23, 25
- Wolfram Research Inc., Mathematica, Version 7.0, Champaign, IL, 2008. 22

6 Приноси на дисертационния труд

1. Създаден е аналитичен модел за пресмятане на йонизацията от космически лъчи в атмосферата и йоносферата на базата на пет-интервална апроксимация на функцията на йонизационните загуби, който е подобрене на съществуващите модели предложени от Dorman (2004); Velinov et al. (2004, 2005a, 2009); Velinov and Mateev (2008a,b); Usoskin et al. (2009).
2. На базата на аналитичния модел за пресмятане на йонизационни загуби на космическите лъчи за пет-интервална апроксимация на функцията на йонизационни загуби е разработен числен алгоритъм CORIMIA (COsmic Ray Ionization Model for Ionosphere and Atmosphere) посредством платформата Mathematica 8.0.
3. Направена е количествена оценка с CORIMIA на профилите на електронната продукция вследствие на преминаване на поток от галактически космически лъчи през средната атмосфера и ниската йоносфера (30 - 120 km височина) при различни фази на слънчевата активност (слънчев минимум, максимум и умерена активност) и за различни геомагнитни ширини.
4. Посредством програмния продукт CORIMIA са построени профилите на йонизация от потоците слънчеви космически лъчи, породени от мажорните слънчеви протонни събития GLE 05 (23.02.1956) и GLE 69 (20.01.2005) в средната атмосфера и ниската йоносфера за различни геомагнитни ширини. Направен е анализ на тези две най-силни корпускуларни въздействия на слънчевата активност върху околното космическо пространство.
5. Количествено са представени йонизационните профили от аномалните космически лъчи в средната атмосфера и ниската йоносфера за различни ширини в полярната шапка - до полярния касп. Направено е сравнение между спектрите и йонизациите на трите вида космически лъчи: ГКЛ, СКЛ и АКЛ. Направен е физически анализ и количествена интерпретация на разглежданите случаи посредством числения алгоритъм CORIMIA.

7 Публикации на автора свързани с дисертационния труд

Резултатите от приносите на дисертационния труд са представени в следните публикации:

Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L., Numerical calculation of cosmic rays ionization rate profiles in the middle atmosphere and lower ionosphere with relation to characteristic energy intervals, *Acta Geophysica*, Vol 61, No 2, 494-509, 2013, DOI: 10.2478/s11600-012-0084-y.

Velinov P.I.Y., Asenovski S., Kudela K., Lastovicka J., Mateev L., Mishev A, Tonev P., Impact of cosmic rays and solar energetic particles on the Earth's ionosphere and atmosphere, *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3, 2013, A14, 1-17.

Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L., Mishev A., Improved cosmic ray ionization model for ionosphere and atmosphere (CORIMIA) with account of Monte Carlo simulations, *Journal of Physics, Conference Series (JPCS)*, JOP (Institute of Physics), 2012, Vol. 372, pp.1-4.

Assenovski S.N., Stoykova D., Study of correlation between wolf numbers and the geomagnetic activity, CP1121, *Space Plasma Physics* (Edited by I. Zhelyazkov), American Institute of Physics, 2009, pp.151-155.

Asenovski S.N., Estimation of the three components of the solar wind energy throughout the solar system, *Sun and Geosphere*, Vol 7, 2012, No 1, pp.49-50.

Tassev Y., Assenovski S.N., Donev E., Ivanov D., Danchovski V., Comparative analysis of ground level ozone distribution in Sofia and Plana Mountain during 2007-2009, *C.R. Acad. bulg. Sci.*, 63, 2010, No 10, pp.1521-1532.

Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L., Simulation of cosmic ray ionization profiles in the middle atmosphere and lower ionosphere on account of characteristic energy intervals, *C.R. Acad. bulg. Sci.*, 64, 2011, No 9, pp.1303-1310.

Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L., Improved COsmic Ray Ionization Model for the Ionosphere and Atmosphere (CORIMIA) with account of 6 characteristic intervals, *C.R. Acad. bulg. Sci.*, 65, 2012, No 8, pp.1135-1144.

Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L., Ionization of anomalous cosmic rays in ionosphere

and middle atmosphere simulated by CORIMIA code, C.R. Acad. bulg. Sci., 65, 2012, No 9, pp.1261-1268.

Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L., Ionization of solar cosmic rays in ionosphere and middle atmosphere simulated by CORIMIA program, C.R. Acad. bulg. Sci., 66, 2013, No 2, pp.235-242.

Asenovski S.N., Velinov P.I.Y., Mateev L., Determination the spectra and ionization of anomalous cosmic rays in polar regions, C.R. Acad. bulg. Sci., 66, 2013, in press.

Velinov P.I.Y., Mishev A., Asenovski S.N., Mateev L., New improved operational models for cosmic ray effects in space physics, Bulg. J. Phys., 38, 2011, pp.264-273.

8 Участия на автора с доклади по темата на дисертацията на международни мероприятия

Резултати от приносите на работата по дисертационния труд са представени в следните доклади на международни конференции:

Velinov P.I.Y., Mateev L., Asenovski S., Improved cosmic ray ionization model for the system lower ionosphere - middle atmosphere. Determination of approximation energy interval characteristics for the particle penetration, Report C23-0013-10 on the XXXVIII-th General Scientific Assembly of Committee on Space Research - COSPAR, Bremen, Germany, July 18 - 25 July, 2010.

Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L.N., Improved operational Cosmic Ray Ionization Model for the Atmosphere (CORIMIA), Workshop on Assessment and validation of space weather models, Alcalà de Henares, Spain, March 16-17, 2011.

Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L.N., New improved operational model for cosmic ray effects in space physics, International Conference on Physics in Memoriam Acad. Prof. Matey Mateev, Sofia, Bulgaria, April 10-12, 2011.

Velinov P.I.Y., Mateev L.N., Tonev P., Tassev Y., Asenovski S.N., Mishev A., Development of new operational models in space weather and space climate, National Conference with International Participation - Cosmonautics as a Factor in Development of International Scientific and Humanitarian Collaboration, Sofia, Bulgaria, April 20, 2011.

Velinov P.I.Y., Mateev L.N., Asenovski S.N., Improved cosmic ray (CR) ionization model for the atmosphere. Determination of energy intervals for CR penetration, Workshop Solar Influences

on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere, Sozopol, Bulgaria, June 6-10, 2011.

Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L.N., Elaboration of new cosmic ray ionization model for the middle atmosphere and ionosphere, Seventh Scientific Conference - Space Ecology Safety, Sofia, Bulgaria, November 29 – December 1, 2011.

Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L.N., Development of new Cosmic Ray Ionization Model for the Atmosphere (CORIMIA) with account to 4 - characteristic intervals, Eighth European Space Weather Week, Namur, Belgium, November 28 - December 02, 2011.

Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L.N., Improved operational Cosmic Ray Ionization Model for the Atmosphere (CORIMIA) with account of 6 characteristic intervals, COST Action ES0803 Developing Space Weather Products and Services in Europe, Workshop on Final Results, Prague, Czech Republic, March 13-14, 2012.

Velinov, P.I.Y., Asenovski S., Mateev L., Improved COsmic Ray Ionization Model for Ionosphere and Atmosphere (CORIMIA) with account of Monte Carlo simulations, Report on 23rd European Cosmic Ray Symposium and 32nd Russian Cosmic Ray Conference, Moscow, Russia, July 3 - 7, 2012.

Velinov P.I.Y., Asenovski S.N., Mateev L.N., Electron production by cosmic rays simulated by CORIMIA (COsmic Ray Ionization Model for Ionosphere and Atmosphere) code, Ninth European Space Weather Week, Brussels, Belgium, November 5 - 9, 2012.

Asenovski S.N., Velinov P.I.Y., Mateev L.N., Atmospheric Ionization by Solar Energetic Particles, Sun2climate school: Impact of solar variability on the Earth's climate, Thessaloniki, Greece, March 10 - 15, 2013.