

## КРАТКО ОПИСАНИЕ НА НАУЧНИТЕ ПОСТИЖЕНИЯ

### 1. Въздействие на галактическите космически лъчи

57 публикации: 6, 7, 8, 9, 13, 16, 17, 20, 21, 23, 25, 26, 27, 29, 36, 37, 39, 46, 48, 49, 54, 73, 82, 91, 95, 98, 99, 119, 120, 121, 124, 138, 162, 167, 171, 172, 174, 185, 190, 198, 217, 233, 257, 259, 260, 261, 265, 267, 269, 281, 282, 285, 291, 292, 293, 294, 295.

#### Основни приноси:

- Разработена е физическа теория за йонизацията на Галактическите Космически Лъчи (ГКЛ) в йоносферата [73, 82, 121, 171, 172, 174, 189, 259, 265, 267, 280, 291], която е потвърдена от редица експериментални наблюдения с радиовълни по методите А3 и А1, както и от ракетни измервания [26, 73, 217].
- Изведени са формули за електронната продукция от релативистичните [6, 8, 17, 25] и нерелативистични [7, 13, 17, 119, 120] ГКЛ в зависимост от геомагнитната ширина, спектъра и състава на първичните частици.
- Получени са изрази за планетарното разпределение [16] и енергетическия баланс [16, 46] на йонизацията на ГКЛ в земната атмосфера.
- Изчислени са профилите на електронната продукция и на електронната концентрация [91, 95, 162, 167] за различни сезони, ширини и фази на слънчевата активност в зависимост от състава и разпределението на ГКЛ [17, 73].
- Изведени са изрази за ефективния геомагнитен праг и пенумбра на ГКЛ [39] и за тяхната източно-западна асиметрия [79] при проникването им в йоносферата.
- Показано е, че йонизацията на вторичните КЛ в средната и висока атмосфера се оказва съизмерима, а при някои хелиоактивни периоди дори доминираща спрямо първичната йонизация [54, 138].
- Създаден е 3D (тримерен) модел за планетерната йонизация на ГКЛ в ниската йоносфера (50-90 км) [198].
- Предложена е хипотеза за слънчево-земните въздействия: тригерен механизъм на КЛ в галактично-слънчево-земните връзки [244, 256].
- Изведени са нови изрази за атмосферните прагове и за пробега на космическите частици от енергийните интервали III, IV и V в околопланетните пространства [261, 269].
- Извършена е класификация на енергетичните частици в околоземното космическо пространство, като те са разпределени в осем типа според техния произход, енергия, област на ускорение и геоэффективност в планетните йоносфери [253, 259].
- Получена е формула за йонизиращата способност на ГКЛ [8]. Тя е изчислена за най-разпространените изотопи (от водорода  $Z=1$  до урана  $Z=92$ ) в слънчевата система [264, 292], които отразяват състава на първичните ГКЛ.
- Във връзка с обобщения интеракционен модел на КЛ с планетните йоносфери [257, 260] е моделиран спектъра на първичните частици с помощта на изглаждащи функции: аркус тангенс [277, 265], тангенс хиперболичен [277, 281, 282], експоненти [294], а също и без изглаждащи функции, т.е. с реални спектри [233, 273]. Тези случаи имат своите преимущества в зависимост от конкретните условия.
- Предложен е нов три-компонентен спектър на КЛ [297], като коефициентите му са многофакторни и зависят от нивото на слънчевата активност, междупланетното магнитно поле и др.
- Изведена е формула за радиационните въздействия на КЛ и на частиците на радиационните пояси на Земята върху космическите полети във високата йоносфера [21].
- Въз основа на ново вариационно уравнение за областта F са изведени изрази за разпределението на дозата и за повърхностната доза при орбитален полет на височини между 200 и 1000 км и при пресичането на вътрешния радиационен пояс (между 1000 км и 6000 км).
- Построен е модел за изчисляване на защитата на космическите екипажи [166, 49]. Извършени са изчисления във връзка с полета на втория български космонавт (7-17.06.1988). Тези резултати са сравнени с данните от измерванията на орбиталната станция “Мир”, като най-

големите разлики (до 15 - 35 %) се получават при прелитането над Южно - Атлантическата аномалия [167].

- Открит е Форбуш ефект в космическия слой С в ниската йоносфера с помощта на абсорбционния метод АЗ (съвместно с чл. кор. Г. Несторов) [27, 37].
- Посредством същият метод там са открити и 27-дневни вариации, които се обясняват с 27-дневните вариации в КЛ и геомагнитното поле [29].
- Установена е 11 - годишна модулация в космическия слой, която е обратна с поведението на областта F, т.е. съществува анти-фазност между основата на йоносферата и нейния главен максимум [23, 26, 154].
- Разработен е количествен метод за определяне на измененията в космическия слой по данни от КЛ и от геомагнитното поле [124]. Този метод се основава на изведените вариационни уравнения за йонизацията и абсорбцията в космическия слой [20, 23].
- Според новите вариационни уравнения измененията в космическия слой се разделят на три класа: атмосферни, геомагнитни и космически [48, 73]. Към последните се отнасят Форбуш-ефектите [27, 37], 11-годишните [26] и 27-дневните [29] вариации, както и СКЛ [9, 17, 36, 73].
- Посредством получените вариационни уравнения могат да се определят пространствено - времевите зависимости на първичните потоци космически частици, въз основа на йоносферни данни [124].

## **2. Въздействие на слънчевите космически лъчи**

54 публикации: 9, 14, 15, 17, 18, 19, 22, 26, 28, 30, 33, 36, 38, 43, 45, 49, 52, 56, 57, 67, 68, 73, 83, 85, 98, 99, 100, 104, 105, 107, 120, 121, 122, 125, 126, 129, 138, 139, 146, 148, 155, 166, 170, 183, 212, 215, 227, 253, 267, 268, 273, 274, 282, 287.

- Направени са нови теоретични и експериментални разработки за въздействието на Слънчевите Космически Лъчи (СКЛ) върху йоносферата [9, 14, 26, 73, 120]. Теорията, разработена за въздействието на ГКЛ е модифицирана и за СКЛ [17, 36, 49].
  - Изведени са уравнения за височинните профили на йонизацията при високи и средни ширини при вертикално и изотропно проникване на частиците [18, 38]. Разпределенията на йонизацията са изчислени от основата на йоносферата до височини 120 - 140 км [126].
  - Въз основа на оригинални формули са построени профилите на електронната продукция [18, 19, 28, 36, 107, 125, 170, 265-268, 293] и на електронната концентрация [73, 172, 212, 217].
  - Даден е един опростен полуемпиричен метод за изчисляване на йонизацията [19].
  - Теоретично и експериментално е доказан директният ефект на СКЛ върху средната и висока атмосфера, както и типовете послеефекти (съвместно с акад. Д. Мишев и чл.кор. Г. Несторов) [9, 15, 139, 146, 212, 215, 217, 227, 257, 267].
  - Изчислено е влиянието на параметрите на СКЛ и околоземното пространство върху йоносферните профили [28, 30, 33].
  - Изведени са формули за моделиране на основното високошироко явление Polar Cap Absorption (PCA) (Поглъщане в полярната шапка) [43, 45]. Аналитичните изрази за енергийната дисипация позволяват да се определи разпределението на отдадената енергия в полярната йоносфера при спиралното проникване на СКЛ [52, 73, 100].
  - Построени са нормализирани йонизационни профили в резултат на проникването на високо енергетични частици и СКЛ в околоземното пространство [148, 156].
  - Експериментално и теоретично са изследвани йоносферните ефекти след големите протонни ерупции през 1971 и 1972 възникнали след максимума на 20 слънчев цикъл [56, 57, 67, 68, 83, 85]. Тези проучвания са обект на международни проекти и дават възможност за комплексни изследвания.
- Установена е: а) релаксация 1-2 часа на йоносферния ефект спрямо основния ефект на СКЛ;  
б) послеефект в йоносферата 2-3 дни след максимума на геомагнитната буря;  
в) вертикално разгръщане на послеефекта в цялата йоносфера. Първоначалното смущение възниква във високата атмосфера и впоследствие се спуска към областта D;

г) регистрирани са серии от редуващи се позитивни и негативни аномалии в критическите честоти и др.

- Определена е честотната (10-100 МХц) зависимост на неотклоняващата абсорбция на радиовълните за случаите: спокойна средноширотна йоносфера, полярен касп и при проникване на СКЛ [173].

- Проведено е комплексно физическо изследване на въздействието на СКЛ през време на протонните ерупции върху различните йоносферни нива (през 20 км.) от 80 до 260 км. Установени са предвестници 30 минути преди ерупцията [146].

- Развита е теория за анизотропната корпускуларна йонизация в йоносферата посредством въвеждането на общи функции на първичните пространствени и спектрални разпределения [129, 131].

- Изведени са аналитични изрази при голям ъгъл на проникване на СКЛ и субКЛ, т.е. квазихоризонтално и хоризонтално проникване [121, 122].

- Построен е нов числен модел за йонизацията на СКЛ в средната атмосфера [170, 185, 212], който успешно е приложен за количествения анализ и интерпретация на конкретни хелиоактивни ситуации в космическата физика [134, 215].

- Показано е, че различните групи частици на СКЛ създават стратифицирани слоеве в областта 40-100 км [170].

- Разработен е дву- и три-диапазомен модел за интеракцията на нискоенергетичните частици в йоносферните области D, E и F [98, 104, 105, 107].

- Разгледани са в обобщен вид някои въпроси от взаимодействието на излъчването с веществото [82] с отчитането на енергетическото и пространствено разпределение на проникващите радиации [49].

### **3. Въздействие на субкосмическите лъчи и корпускуларни потоци**

21 публикации: 31, 32, 47, 66, 67, 68, 73, 107, 114, 116, 117, 118, 123, 137, 138, 141, 142, 144, 151, 155, 250.

- Разкрити са физическите закономерности на въздействията на субкосмическите лъчи (субКЛ) и корпускуларните потоци (КП) върху средната и висока йоносфера, а също така и върху областта D - главно в преходната D-E област [31, 73, 137].

- По време на геомагнитни бури с внезапно начало SSC (Sudden Storm Commencement) е установен положителен ефект в нулевия и послеефект на втория и третия ден - Post Storm Effect (PSE) (съвместно с чл.кор. Г. Несторов) [31].

- Открити са три типа ефекти PSE след SSC в годините на минимална [47], нарастваща и максимална [66] слънчева активност.

- Регистрираните отрицателни ефекти в нулевия ден (много рядко), са интерпретирани като различни съотношения между отклоняващата и неотклоняващата абсорбция и степента на магнито-йоносферни смущения [73].

- При изследването на дълги периоди след геомагнитни бури са открити няколко PSE през 2-3 дни, които са наречени квазипериодични PSE [123] или модулирани изсипвания на КП. Те са интерпретирани като квазипериодични геомагнитни пулсации, породени от МХД градиентни вълни.

- Разработен е метод за анализ на слънчево-йоносферните връзки и за изчисляване на КП в нощния слой E по абсорбционни и геомагнитни данни [31, 68].

- Изучени са SSC ефектите върху йоносферата вследствие на короналната мас-инжекция на Слънцето на 10-11 януари 1997 [250]. Тези силни ефекти (едновременно нарастване на критичните честоти и височината на главния йоносферен максимум, интензивни квазипериодични колебания и др.) не са съпроводени със слънчеви ерупции, което е едно предизвикателство към традиционните схващания. Това инициира едно по-обстойно изучаване на влиянието на двадесетте най-силни геомагнитни бури с SSC през XX век върху главния йоносферен максимум [296].

- Посредством спътниците “Интеркосмос България 1300” и “Дайнимикс Експлорър - Б” е намерена екваториалната граница на корпускуларните изсипвания и PSE [151, 155], която при по-силните бури слиза до средни ширини. Установено е, че PSE обхваща цялата вътрешна йоносфера (от 50 до 300-350 км) [155] (съвместно с акад. К. Серафимов).

- За пръв път в България са проведени паралелни наблюдения между йоносферната абсорбция и зелената кислородна емисия 557,7 nm в светенето на нощното небе, като е установена висока степен на корелация през време на магнито-йоносферни бури [94, 111].

- Установена е ролята на субКЛ и КП за поддържането на нощната йонизация в областите D и E [32]. Разработен е метод и е получена формула за определяне на електронната продукция вследствие изсипващи се магнитосферни частици с дадено питч-разпределение [32].

- Оценен е приносът на вторичните КЛ върху образуването на нощната област F [138, 145].

- Посредством решаването на уравнението на топлопроводността са получени формули за температурния ефект на субКЛ и КП през време на геомагнитни бури при стационарни [114] и нестационарни [116, 117] условия.

- Получени са аналитични решения и са построени вертикалните разпределения (100-500 км) на неутралната температура през главната фаза на геомагнитната буря (или суперпозиция на две или повече бури) [118, 141, 142]. Определен е и меридионалният температурен градиент, който влияе върху ветровете и върху електронната концентрация на планетарната йоносфера [142, 144].

- Числено е моделирано проникването на компресионни повърхнинни МХД вълни през средната атмосфера [168]. Въз основа на развития модел е показано, че дисипацията на МХД енергия може да стане не само в слоя E, но и в областта D и мезосферата (в областта на каспа) [168].

- Показана е ролята на двойните слоеве като ускорители на частиците в системата магнитосфера-йоносфера [164].

- Дадени са оценки за приноса на магнитосферното и йоносферното динамо като са отчетени новите измервания за неутралните ветрове от геофизичната обсерватория в Царево [163].

- Дадено е йоносферно приложение на кинетичното уравнение на Болцман с отчитане на йонизационно - неутрализационните и преносни процеси [230]. Това уравнение е решено в апроксимация на пертурбация от първи порядък [231] с помощта на Лапласова трансформация [234]. Изведен е и изразът за дисперсионния закон на модифицираното уравнение на Болцман за йоносферата [235].

#### **4. Астрофизически аспекти на КЛ - ускорителни механизми**

17 публикации: 34, 40, 41, 50, 51, 53, 55, 58, 59, 62, 71, 75, 77, 80, 81, 264, 292.

- Посредством включването на йонизационните загуби в уравнението на преноса на ГКЛ са изведени формули за спектъра на частиците при статистическия механизъм на ускорение тип Ферми [34, 40, 50]: 1) в областта на ускорението и 2) при разпространението им. Показано е, че ефектът на загубите е особено съществен за по-тежките ядра в областта на нерелативистичните енергии.

- Изведени са нови изрази за времето на живот на ГКЛ в различните енергийни интервали [51] при отсъствие [41] и наличие [53] на ускорение в междוזвездната среда.

- Получени са формули за диференциалните спектри и концентрацията на ГКЛ в зависимост от параметрите на средата при ускоряването [77] и при разпространението [80] на атмосферно ефективните КЛ.

- Дадени са нови изрази за електронната компонента в състава на ГКЛ като са обяснени особеностите в нейния наблюдаван спектър [81].

- Изведени са формули, отчитащи ефекта на йонизационните загуби върху темповете на акселерация, спектъра и състава на геоэффективните частици, ускорявани в слънчевата хромосфера и корона при бетатронно, електрическо и ускорение тип Ферми I и II [55, 58, 59, 62].

- Извършено е третиране на този проблем в общ аспект: посредством решаването на уравнението на непрекъснатостта и на енергията на КЛ са получени изрази за времевата еволюция на концентрацията и енергията на частиците в разширяващата се Вселена [71, 75].

- Изчислен е приноса на различните ядра в състава на космическите лъчи (със заряди от 1 до 92 - ураний) в йонизацията и възбуждането на междупланетната и междувъзвездната среда [264, 292].

## **5. Въздействие на КЛ върху планетните йоносфери**

18 публикации: 44, 74, 173, 236, 238, 240, 242, 254, 262, 265, 266, 268, 271, 272, 274, 286, 287, 293

- Разработената теория за въздействието на ГКЛ и СКЛ [119, 125] е приложена и за йоносферите на другите планети [44, 74, 265, 266]. Първоначално теорията е използвана за атмосферата на Марс [173].

- Създаден е числен модел и са построени йонизационните профили (0-100 км) при различни фази на слънчевата активност, за три модела на марсианската атмосфера и при наличие на прашни бури в нея (по данни на автоматичната космическа станция “Маринър-9”) [173].

- Показано е, че за планетите-гиганти от Юпитеровата група и други тела - спътници (Титан), Плутон и транс-нептуновите обекти, приносът на ГКЛ спрямо XUV-радиацията е съизмерим и даже доминиращ - за Уран и Нептун [44].

- Тъй като планетите-гиганти имат значителна сплеснатост, т.е. явяват се ротационни елипсоиди, за тях е изведена нова модифицирана функция на Чепмен МФЧ, която отчита тяхната геометрия [236, 265, 271].

- Изведени са специфични изрази за йоносферите в полярните райони (ширини  $\pm 90^\circ$ ) при всички ъгли на проникване на радиацията [272].

- Създаден е нов модел за йонизацията на космическите лъчи в елипсоидални планетни йоносфери [242, 254, 266, 272]. Моделът е приложен за Юпитер и Сатурн, които притежават най-голяма сплеснатост [266].

- Открит е нов тип изгревно-залезен ефект в йоносферата на Юпитер, зависещ от ширината и слънчевата деклинация [262, 265]. Този ефект не съществува в съвременния плосък Юпитеров йоносферен модел и не може да се отчете от класическата сферична функция на Чепмен.

- Създаден е тримерен йонизационен модел (приложен за Сатурн) [293], който отчита азимуталната зависимост на профилите на електронната продукция.

- С помощта на статистически анализ е открит ефект в магнитосферата от МХД (магнитохидро-динамичната) лунна следа, дължаща се на процеса на обтичане на Луната от слънчевия вятър [158].

- Построен и теоретичен модел за въздействието на дребномащабните нееднородности на лунната следа върху външната магнитосфера и по-специално върху магнитопаузата [158].

## **6. Физика на йоносферата**

53 публикации: 1, 2, 10, 11, 12, 13, 24, 42, 48, 73, 91, 95, 96, 97, 103, 113, 136, 143, 147, 149, 153, 159, 163, 165, 180, 214, 219, 225, 249, 258, 263, 283, 284.

публикации по метеорологичен контрол: 88, 89, 92, 93, 108, 109, 110, 110b, 112, 115, 127, 128, 130, 133, 135, 152, 154, 187, 194, 202.

- Изведена е формула за минимално необходимата електронна концентрация на дългите радиовълни при отражението им от областта D (съвместно с чл.кор. Г. Несторов) [2].

- Намерени са зависимости на височинните вариации на електронната плътност и честотите при отражение от ниската йоносфера [1].

- Разкрити са аналогии между изразите за корпускуларната и електромагнитна радиация при тяхното въздействие върху йоносферата [10]. Изведено е общо уравнение за вариацията на електронната продукция от вълни и частици [10]. Това уравнение е приложено за космическия слой в ниската йоносфера [11].

- Предложена е физическа теория за йонизационните вариации в йоносферата [10, 24, 42]. Получени са вариационни уравнения за йонизацията на вълновата XUV радиация [24] и за ГКЛ [10, 13, 48]. Вариациите са разпределени в три класа: метеорологични, геомагнитни и първични [73]. В метеорологичната вариация аналитично са разделени и представени локалния и интегрален температурен ефект и локалния и интегрален барометричен ефект [24].
- Изведени са вариационни уравнения за електронната концентрация в  $\alpha$ -,  $\beta$ - и комбиниран  $\alpha\beta$ - слой, с което практически се обхващат всички случаи в йоносферата [42].
- Получено е аналитично решение на йоносферното балансно уравнение и е изведена формула за електронната концентрация при слънчеви хромосферни ерупции [12].
- Предложен е секанс квадрат хиперболичен модел за разпределението на електронната концентрация в космическия слой [91, 95]. С този модел са изведени формули за абсорбцията на радиовълните в различни честотни диапазони [96].
- Предложен е и обобщен експоненциален модел за профилите на електронната плътност в ниската йоносфера [97, 143], като са решени съответните абсорбционни интеграли и са определени параметрите на модела при различни зенитни ъгли на Слънцето, сезони, степени на смутеност (СКЛ и магнитосферни бури) [103].
- Дадено е решение на обратната йоносферна задача посредством Симплекс метода [113].
- Предложен е нов тип балансно уравнение в дневната област F с алфа-рекомбинация [214, 217], като е изведена формула за максималната електронна плътност в зависимост от движенията (ветрове, дрейфове и дифузия). Това уравнение е решено числено, за да се обясни дневната аномалия на главния йоносферен максимум [223].
- Въз основа на 22-годишен период са изучени разликите между максималните и обедните критични честоти в зависимост от сезона и слънчевата активност [152]. Получен е квазисиметричен двумакумумен (март и октомври) сезонен ход.
- Изведени са формули за времето на релаксация на йоносферната област F в нейния максимум и във външната йоносфера [222], където градиентът на електронната концентрация е отрицателен. Тази релаксация е обяснена и чрез термичния режим на високата атмосфера и вариациите на рекомбинационния коефициент [162].
- Разработен е нов механизъм за квази-периодичните осцилации на електронната концентрация в йоносферите на Земята и планетите [258].
- За първи път у нас по данни на йоносферната станция в София обстойно са проучени (съвместно с чл.кор. Г. Несторов) морфологичните закономерности на високата йоносфера, точно на главния йоносферен максимум и неговите връзки с нижележащите области [153].
- Изследвани са дългопериодичните (11- и 22-годишни) и сезонни вариации на критическите честоти на слоя F2 над София за периода 1962-1983 год. Годишните ходове показват асиметрия между четния и нечетен слънчев цикъл, като асиметрията има подчертано сезонна зависимост. Установена е и пролетно-есенна асиметрия [154].
- Построен е аналитичен и числен модел за въздействието на динамиката на неутралния газ върху сезонната вариация в средната йоносфера [136], като по този начин е обяснена наблюдаваната зимна аномалия на късите радиовълни.
- Извършено е сравнение на 123 йоносферни профила (100-300 км), получени от йонограми, с международните йоносферни референции (IRI) [147], като е дадена рекомендация за годините на слънчев максимум.
- Изследвано е глобалното разпределение на йонната концентрация в южното полукълбо във висотния интервал от 800 до 900 км въз основа на резултатите от измерванията със спътника “ИНТЕРКОСМОС-България -1300” [157], като е получена планетарната картина. Показано е, че дължинните особености на взаимодействието на неутралния вятър с плазмата имат първостепенно значение при формирането на глобалните особености в разпределението на концентрацията.
- Въз основа на данни от спътника “Атмосфер Експлорър Е” за първи път е открито новото явление в екваториалната и тропична йоносфера - внезапно нарастване плътността на йоните  $\text{NO}^+$  и  $\text{O}_2^+$  при изгрев Слънце [165] (съвместно с акад. К. Серафимов и проф. Ц. Дачев). В същото време намаляват концентрациите на главните йоносферни компоненти  $\text{O}^+$  и

електронната концентрация. Тези резултати са обяснени с фотохимичните процеси и реакции и с неутралните ветрове в областта F [165, 169].

- Проведени са паралелни синхронни измервания в йоносферата от 60 до 650 км чрез наземни методи и спътника “Метеор-Природа” [140, 149]. Показано е, че интегралното съдържание на електроните и височината на главния йоносферен максимум имат послеефекти-екстремуми на третия ден след геомагнитните бури (резултатът е съвместен с акад. Д. Мишев и чл.кор. Г. Несторов).

- Установено е, че бифуркацията на областта F и числото на поява на слоя F1 са в обратна зависимост от числото на слънчевите петна и е разкрита сезонната им зависимост [283, 284].

- Анализирани са йоносферните ефекти на частичното слънчево затъмнение от 12 октомври 1996 и на пълното слънчево затъмнение от 11 август 1999 [249, 263]. В йоносферата се наблюдава осцилиращо поведение, обяснено с вътрешните атмосферни вълни, породени от свръхзвуковата ( $\approx 700$  м/с) лунна следа, която прекъсва слънчевото нагряване, охлажда атмосферата (особено в тропосферата и озоносферата) и генерира вълнови смущения [249].

#### Метеорологичен контрол върху йоносферата

- Предложена е хипотеза за обяснение на лятно-зимния преход на режима в областта D (Халовен ефект) посредством изменението на есенната циркулация на ветровете и под действието на слънчевата и геомагнитната активност и приливните сили в системата Слънце - Земя - Луна [88, 93].

- За обяснение на сезонните вариации на абсорбцията на късите вълни е построен модел на ниската йоносфера с отчитане на йонизацията на радиациите Лайман-алфа, X и ГКЛ [127].

- Предложена е четири-йонна схема за положителните йони [130] и са изчислени профилите на електронната концентрация и абсорбцията, като е показано, че нормалната компонента на зимната аномалия се създава от сезонните вариации на температурата и плътността на атмосферата [128, 135].

- Моделирана е сезонната вариация на ефективната скорост за формиране на кластерни йони, която определя коефициента на рекомбинация в областта D [133]. Извършено е подобрене на модела на ниската йоносфера в сравнение с Международната Референтна Йоносфера (ИРИ) и други емпирични модели [159, 180].

- Въз основа на нов теоретичен модел на областта D са построени профилите на електронната концентрация при дневни и нощни условия в зависимост от сезона и са обяснени сезонните изменения на абсорбцията [180]. По този начин са обяснени зимната аномалия на къси вълни и лятната аномалия на дълги радиовълни [152].

- Открит е паралелизъм между сезонните ходове на йоносферната абсорбция в широк честотен обхват на късите вълни и скоростта на зоналната компонента на вятъра във високата атмосфера (по модела CIRA) [89, 92]. Същото е потвърдено и за дългите [108] и средните [109] радиовълни по измервания в йоносферната обсерватория в София.

- Тези връзки са разширени и за максималните и нулеви тахоконтури в екваториалната, средноширотна и полярна страто-мезосфера и ниска термосфера [112, 115]. По такъв начин е доказано въздействието на динамичните структури на зоналната циркулация върху йонизираната компонента в средната атмосфера [110].

- Построен е емпиричен модел на параметрите в средната атмосфера (температура, налягане, плътност и ветрове) по ракетни данни в Югоизточна Европа в зависимост от слънчевата активност [187, 194, 202, 204].

### **7. Въздействия на електрическите полета с тропосферен произход върху средната и висока атмосфера**

34 публикации: 3, 4, 176, 177, 178, 179, 182, 184, 188, 191, 192, 193, 199, 203, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 213, 214, 218, 220, 221, 223, 229, 243, 251, 252, 280, 288, 290.

- Установен е ефект на мълните и гръмотевичните бури върху йоносферните области D, E и F въз основа на 81 наблюдавани случая [176, 182]. Регистрирано е: (1) рязко нарастване на

граничните честоти на спорадичния слой, или (2) изчезване на този слой последвано от силни послеефекти в минималната честота на отражение и критичната честота на слоя F2. Двата типа ефекти зависят от фазата на слънчевата активност.

- Горният ефект се потвърждава от анализа на няколко конкретни случая през зимния сезон [241, 288], където са установени сложни въздействия съпроводени с четири типа отражения: основно и двойно отражение от слоя F, и многократни M и N отражения от спорадичния слой и областта F.

- Направен е принос към несиметричните антенни системи като е разработена теория на несиметричния вибратор [3] и е даден един метод за коригиране на грешките при лещовите антени [4].

- Посредством методите на комбинаториката и теорията на графите е разработен модел (аналитичен и числен) за еквивалентната електрическа верига (ЕЕВ) между йоносферата и Земята при мълниев и гръмотевични бури [195, 223].

- Изведена е формула за йоносферния потенциал при мълниев разряд, като е решена системата диференциални уравнения на Кирхов в ЕЕВ [186].

- Представен е тензорът на проводимостта в йоносферата и средната атмосфера [221], като са изведени аналитично надлъжната проводимост и проводимостите на Хол и Педерсен. Тези проводимости са моделирани за различни ширини при спокойни и смутени условия, вкл. наличие на СКЛ.

- Получени са аналитични решения за проникването в йоносферата на електрическите полета от гръмотевичен облак на високи и средни ширини с триполусна структура на електрическите заряди в стационарни условия при опростено представяне на профилите на проводимост [177, 199].

- Получени са формули за вариациите на електронната плътност в йоносферната област E, възникващи в резултат на тези електрически полета, като са изследвани големината и характерния размер на вариациите [178].

- Получени са изрази за модификацията на електронната концентрация около главния йоносферен максимум при параболично приближение на несмутения профил [191].

- Тези резултати са разширени в [184, 220], където е изследвана модификацията на профила на електронна концентрация в йоносферните области E и F, възникваща при различни модели на гръмотевичен облак.

- Изразени са аналитично вариациите на йоносферния електрически потенциал над гръмотевичен облак и е изследвана големината на тези вариации [179].

- Получено е приближение в явен вид на разпределението на електрическото поле в йоносферата и е оценена съвместната му зависимост от структурата на гръмотевичните заряди и профилите на проводимостите [192, 193].

- Обобщаващи резултати са получени в [208], където е изследвано компонентното разпределение на електрическото поле в различните атмосферни области, както и ролята на долния заряд в триполусната структура на облака. Изучени са модифицираният профил на електронна концентрация над облака и хоризонталният размер на областта на нееднородност.

- С цел изследване ролята на размерите на електрическите заряди на гръмотевичен облак върху генерираните електрически полета E са изведени аналитични решения на разпределенията на E от гръмотевичен облак с триполусна структура в случаите, когато разпределението на всеки заряд е: а) в хоризонтална плоскост [205-207]; б) пространствено [208- 211].

- Изведени са конкретни изрази и са направени изчисления за разпределението на електрическите полета в йоносферата [213] и в приземната атмосфера [214] в зависимост от ефективните размери на зарядите при предположение за тяхното модифицирано елипсоидално гаусово пространствено разпределение. Оценена е ролята на пространственото разпределение на зарядите върху електрическите полета в цялата област “йоносфера-земя”.

- Моделът и съответните числени резултати за разпределението в областта “йоносфера-земя” на стационарните E от гръмотевичен облак са уточнени и развити в [213, 214], където са въведени значително по-адекватно представяне на профилите на атмосферната проводимост и по-реалистично гранично условие върху горната граница на модела.



- Теоретично е изследвано съвместното влияние на три фактора върху разпределението в областта “йоносфера-земя” на електрическите полета от гръмотевичен облак: а) профили на проводимост; б) обемно разпределение на електрическите заряди; в) относително изменение на проводимостта в облака спрямо заобикалящия го въздух [229].

- Получени се аналитични решения за пространствено-времето разпределение на електрическото поле от гръмотевичен облак във фазата на формиране на електрическите заряди [191], отначало при опростено представяне на атмосферната проводимост.

- Тези резултати са обобщени в [218], където е отчетен общият ток (сума от тока на проводимост и тока на отместване) и са получени формули за времето поведение на електрическото поле (чрез съответното стационарно поле), както и отношенията между времената на насищане на заряда и полето.

- Изследвани са пространствените разпределения в областта “йоносфера-земя” на квази-стационарните електрически полета от гръмотевичен облак при условие за хоризонтално геомагнитно поле (екваториални ширини), при което се проявява влиянието на проводимостта на Хол [243, 251, 280].

- Предложен е аналитико-числен метод за пресмятане на електрическите полета и са направени някои сравнения със случая на вертикална ориентация на геомагнитното поле (полярни ширини) [243].

- Разработен е уточнен аналитичен модел, с помощта на който са получени по-пълни резултати за пространственото разпределение на електрическите полета. Като характерна особеност за разпределението в ниската йоносфера е установено, че то е с отклонение на изток от гръмотевичния облак и това отклонение нараства с увеличаване на височината [280, 290].

- Получени са аналитични решения за пространствено-времето разпределение на квази-електростатичните полета (КЕСП) в атмосферата и ниската йоносфера над гръмотевичен облак, възникващи в резултат на мълниев разряд [290]. Изчислена е величината на тези полета и е изследвана възможността за генериране чрез тях на потоци от електрони с релативистични енергии, способни да причиняват явлението “червен спрайт”.

- Предложен е теоретичен модел на процесите, протичащи при измерване на квази-стационарни електрически полета в йоносферата над гръмотевичен облак, когато това измерване е основано на електродинамичната (магнито-електрическата) индукция, вместо на електро-статичната [248]. Обобщение на този модел е направено в [252] при участие в процеса на измерване едновременно на електрическата поляризация и намагнитването в специални изкуствени среди

## **8. Нов аналитичен модел CORIMIA за КЛ в йоносферата и средната атмосфера и неговото приложение за планетите**

82 публикации: 298, 299, 301, 302, 303, 306, 307, 309, 313, 315, 316, 317, 318, 319, 321, 323, 325, 328, 329, 331, 333, 334, 336, 337, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 348, 350, 352, 354, 357, 363, 364, 368, 370, 376, 377, 381, 383, 384, 388, 393, 400, 401, 404, 407, 408, 409, 417, 418, 425, 427, 430, 432, 433, 434, 438, 444, 446, 448, 449, 453, 455, 456, 459, 462, 464, 465, 466, 470, 471, 473, 474, 479, 480, 481, 484, 484b,

- Създаден е нов усъвършенстван аналитичен модел за йонизацията на Галактическите Космически Лъчи (ГКЛ) в йоносферата и средната атмосфера [321, 328, 331, 332, 334, 342, 348, 350, 352, 354, 364, 376, 377, 381, 383, 384]. Моделът е приложен и за Слънчевите Космически Лъчи (СКЛ)[302, 313, 315, 316, 317, 341, 354, 363].

- Този модел е компютизиран с кода МАТЕМАТИКА и е представен като операционен модел CORIMIA (COsmic Ray Ionization Model for Ionosphere and Atmosphere). Моделът CORIMIA е приложен за построяване на тримерни 3D профили на йонизация за случаите на ГКЛ, СКЛ и АКЛ [444, 453, 456, 459, 462, 465, 466, 469, 470, 471, 477].

- Като елемент на CORIMIA е изведена 5- интервална функция на йонизационните загуби, която е адекватна на експерименталните данни. Получени са законите за намаление на енергията и съответната електронна продукция от протони с приложение на изведената 5- интервална функция [319, 333].

- Пресметнати са съответните дълбочини в атмосферата [307, 319, 321]. Изчисленията са направени за енергийните интервали 200-850 MeV и 850-5000 MeV. В [321, 334] тези изчисления са продължени за енергийния интервал 5 GeV-5 TeV. Изведен е атмосферният праг, съответстващ на този интервал [321].

- Направени са изчисления за ядра на космическите лъчи със заряд  $Z$ . Приема се случай, в който трансформациите на границите на енергийните интервали попадат в интервал  $[0.15Z^2, 200]$  MeV [331].

- Въведен е нов интервал на намаление на заряда до единичен заряд  $[0.15, 0.15Z^2]$  MeV. Законите за намаление на енергията на КЛ и скоростта на електронната продукция са формулирани аналитично за хелиеви ядра със заряд  $Z = 2$  при трансформации на границите, попадащи в интервал  $[0.15Z^2, 200]$  MeV [333].

- Моделът на скоростта на електронната продукция е развит в общия случай, без ограничение върху трансформациите на границите на енергийните интервали [347, 349]. Тук, обаче, се въвежда междинна област, която свързва тези интервали в аналитичната формулировка на модела. Допуска се 2- и 3- интервална функция на йонизационните загуби. При същите предпоставки в изчисленията са направени за ядра на космическите лъчи със заряд  $Z$ .

- Моделирани са йонизационни профили като е въведен интервала на намаление на заряда до единичен заряд. Изчисленията са направени за 6 групи от ядра на космическите лъчи със заряд  $Z$  [352].

- Моделирани са йонизационните профили за минимална, средна и максимална слънчева активност и е направено сравнение с експериментални данни [321, 363]. В [376] е представен съответният модел за протони с 4- интервална апроксимация. В [364, 376] е развит модел на електронната продукция чрез въвеждане на енергиен интервал на намаление на заряда  $Z$ . Моделът е обобщен за 5- интервална апроксимация за протони и тежки ядра на ГКЛ със заряд  $Z$  [381]. Включен е съответно и интервал на намаление на заряда  $Z$ . Така броят на енергийните интервали фактически става 6. Показан е физическият смисъл на отделните интервали, които съответстват на различните типове частици на космическите лъчи.

- В [383, 384] този модел е представен във връзка с неговите особено важни приложения при изследване на планетните атмосфери, слънчево-земните въздействия и космическото време.

- Разработен е 3D (тримерен) модел на електронната продукция от ГКЛ в средната атмосфера и ниската йоносфера [302, 354, 368] с повишена точност. Сферичността на Земята се отчита с въвеждане на функцията на Чепмен за заредените частици.

- С помощта на тази ФЧ са изчислени и табулирани параметрите на атмосферите на Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун [342, 352] за проникващите ГКЛ и СКЛ.

- Направено е сравнение с елипсоидната планета Сатурн; за нея е изведена нова елиптична функция на Чепмен [298]. На 500 км височина е установена 40% по-висока йонизация за полярните области с нововъведената функция на Чепмен.

- Тази функция е изчислена за планетите гиганти Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун [298, 329, 346].

- За Земята са изчислени профили на електронната продукция (30-120 км) за 6 геомагнитни прага - от екваториалните до полярните области [306], като е установен ефект „коляно” на аномалната компонента на космическите лъчи на високи ширини и в полярния касп [302].

- Предложен е нов три-компонентен спектър на КЛ [306], като коефициентите му са многофакторни и зависят от нивото на слънчевата активност.

- Построено е планетарното разпределение на електронната продукция за височини от 30 км и 100 км за 4 различни ширини в северното и южно полукуълбо [307].

- Открита е значителна вариация на електронната продукция с дължината, съответстваща на вълново число 1 и в двете хемисфери. Този ефект е най-силен за средни ширини и има амплитуда от 3 до 10 пъти.

- В екваториалната йоносфера дълготният ефект е в антифаза с останалите ширини и амплитудата му е незначителна (до 10-15 %) [309]. Физическата причина за това е, че проникващите частици на КЛ се контролират в значителна степен от инклинацията на геомагнитното поле - на средни ширини те проникват почти вертикално.

## Параметризация на спектъра на първичните КЛ

Публикации: 311, 312, 321, 324, 327, 330, 332, 349, 353, 361, 373, 375, 397, 405, 413, 420, 424, 439

- Извършена е нова параметризация на спектъра на първичните космическите лъчи като е предложен модела CORESIA (COsmic Ray Experimental Spectra and Intensity Approximation) за спектрите и интензитета на частиците в различните области на хелио-сферата (~ обема на Слънчевата система);
- Решена е обратната задача за моделиране спектъра на протоните и алфа частиците на ГКЛ в пространството около Земята и планетите гиганти от Юпитеровата група: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун.
- Определени са модулационните коефициенти в спектъра на ГКЛ за Земята и съответните планети при дадени експериментални стойности на диференциалния спектър.
- Показано е, че с нарастване на слънчевата активност модулационните коефициенти на ГКЛ също нарастват, докато стойностите на диференциалния спектър намаляват.
- Диференциалните спектри на ГКЛ, получени с нашето уравнение и тези пресметнати от решението на транспортното уравнение, са в много добро съответствие за протоните и алфа частиците. Стандартното отклонение между двата спектъра е в границите на 1,5%.
- Получените коефициенти от диференциалните спектри са използвани за изчисляване на йонизационните профили на планетите и в частност на Сатурн (планетата с най-голяма сплеснатост 0.1076). Тук е използвана въведената от нас модифицирана (елиптична) функция на Чепмен.

## **9. Космическо време и климат - нова озонна хипотеза**

Публикации: 314, 325, 338, 339, 340, 395, 410, 421, 467, 474

- Разработена е нова хипотеза за слънчево-земните въздействия: тригерен механизъм на КЛ в галактично-слънчево-земните връзки [338]. ГКЛ влияят върху електрическите параметри и химическия състав (включително и върху озона  $O_3$ ) в средната атмосфера и тропосферата. Така ГКЛ пренасят в озоносферата своята слънчева модулация, т.е. най-фините вариации на слънчевата активност. Но озоносферата контролира метеорологичната слънчева константа и следователно термичния режим на атмосферата и океана. Този механизъм на галактично-слънчево-земните въздействия е може би търсения ключ към разрешаване на проблемите в космическата и слънчево-земна физика. Като универсална проникваща радиация ГКЛ определят електрическите проводимости, токове и полета, които играят роля на свързващо звено между различните геосфери: магнитосфера, йоносфера, атмосфера, хидросфера, криосфера, литосфера [335, 354, 354a].
- Установено е, че високо енергичните заредени частици, проникващи в околоземното космическо пространство, имат значителен ефект върху космическото време. Посредством йоносферните методи A1 и A3 е анализирано влиянието на изключителните слънчеви протонни ерупции от 28 октомври 2003 и 20 януари 2005 върху различните йоносферни области [325, 347]. Тези ерупции са съпроводени с релативистични СКЛ и силни геомагнитни бури с SSC. Регистрирано е ново явление - силен позитивен ефект 39% на максималната критическа честота, което несъмнено се дължи на релативистичните СКЛ. Тези изследвания са примери за комплексен анализ на процесите на космическата физика и космическото време.

## Въздействие на КЛ върху озона и други малки съставки

Публикации: 187, 196, 197, 201, 203, 226, 232, 245, 246, 247, 289, 303, 303b, 305, 308, 314, 320, 347, 355, 356, 358, 362, 385, 414, 431

- Малките съставки в атмосферата имат голямо влияние върху нейната термодинамика и енергиен баланс и следователно имат важно екологическо значение. Основната наша работна хипотеза е, че ГКЛ формират долната част на профилите на озона, разположени в максимума на Пфотцер. Тези профили се модулират от различните фактори на слънчева активност.

- На базата на наш теоретичен модел са изчислени профилите на скоростта на озонната продукция вследствие галактическите космически лъчи на ширини 0, 20, 40, 50 и 60<sup>0</sup>, както и в магнито-спрегнатите точки на Земята [203].

- Установено е, че явлението Форбуш-ефект на ГКЛ има пряк ефект върху стратосферния озон (O<sub>3</sub>) и се явява фактическият модулатор на неговата концентрация [232]. Механизмът на въздействие се осъществява чрез вариациите на геомагнитния праг на космическите частици [245-247].

- Дадено е ново обяснение (въз основа на експериментални данни от профилите на озона) за повишаването на плътността на O<sub>3</sub> през зимата при минимална слънчева активност, когато интензитета на космическите лъчи е максимален [362].

- Установен е директен ефект на СКЛ от мажорните протонни ерупции от 20 януари 2005, 14 юли 2000, 19 октомври 1989 и 22 ноември 1977 върху тоталното съдържание на озона (ТСО) и неговото разпределение. ТСО рязко нараства в нулевия ден, което се обяснява с нарастването на температурата над 15 км. Обратно е поведението на други две екологично значими малки съставки: хлороводород и фтороводород (свързан с фреоните) - техните концентрации намаляват вследствие въздействието на СКЛ [246, 247].

- Изучено е поведението на ТСО през време на магнитосферни бури: в нулевия ден е наблюдавано нарастване на ТСО, последвано от значително спадане вследствие на изсипването на частици и частичното разрушаване на озона.

- Намерени са нелинейни корелационни отношения между ТСО и температурата и ветровете в средната атмосфера през време на стратосферни затопляния над Югоизточна Европа.

- Посредством дву-факторен дисперсионен анализ е изследвана зависимостта на озона от потока протони и геомагнитната активност при фиксирани фактори: височините на измерване на озона и диференциалните енергетични спектри. Във всички енергийни интервали се наблюдава намаляване на ефекта на въздействие върху озона с нарастване на височината [303, 305]. Най-големият ефект е между 15 и 18 км при максимална слънчева активност. При слънчев минимум реакцията на озона е пренебрежима.

- Открити са квази 24-часови осцилации на потоците слънчеви протони в енергийния интервал E=0.6-4.2 MeV и на стратосферния озон при спокойни и магнитно смутени периоди [303, 303b].

- Въз основа на разработен числен модел са построени профилите на скоростта на озонна продукция вследствие проникването на поток слънчеви космически лъчи през време на едно от най-големите протонни събития - 14 юли 2000 год. Доказва се, че изменението на температурата на атмосферата на стратосферни височини закъснява и се явява следствие на изменението на концентрацията на озона [289].

- Направен е статистически анализ и след това, въз основа на теоретичен модел е оценено изменението в концентрацията на озона по неговия профил за същият този период. Теоретично е изчислена продукцията на озона от q(h)- профилите в различните етапи на СКЛ. Очертава се нарастване на озона в интервала 15.5 до 18.5 km и намаляването му на 24.5-35 km [347].

- Доказано е различното влияние на потока слънчеви протони (СКЛ от 19 октомври 1989) върху профила на озона: под 19,5 км има нарастване на парциалното налягане на озона, а над 24,5 км се наблюдава намаляване. В долната област (където е максимума на Пфотцер) е определящо влиянието на СКЛ, а в горната област - доминира геомагнитната активност.

- Анализирани са данните (СКЛ от 20 януари 2005) от инструмента MLS на спътника UARS за озона на следните височини 15, 19, 25, 31, 37, 43 и 46 км. Използаните данни са от 50<sup>0</sup> северна ширина и от 0<sup>0</sup> до 40<sup>0</sup> източна дължина. Установява се, че Крос Корелационните Коефициенти (ККК) в различните енергетични интервали и височини проявяват подобно поведение, както при предишните ни изследвания: те са максимални в максимума на Пфотцер, а на височина 46 км ККК са отрицателни по знак със закъснение от няколко дни за протоните с енергии E=156-500 MeV [355, 356].

## **10. Космическо време и климат - влияние на слънчевата активност върху физическите и биологически процеси**

24 публикации: 60, 61, 63, 64, 65, 69, 70, 72, 76, 78, 86, 87, 99, 101, 102, 106, 160, 161, 462, 466, 469, 470, 471, 474

- Направени са приноси към хипотезата на Дружинин - Хамянова за въздействието на слънчевата активност (СА), като тя е значително разширена и за други геофизически процеси: КЛ, поява на комети, йоносфера, полярни сияния, геомагнитна активност, биологични процеси и др. [60, 61, 65].

- Открита е пространствена зависимост на честотите на съответните процеси: в областите по-близо до Слънцето нараства честотата на слънчево обусловените преломи [61].

- Намерени са зависимостите не само между годишните, но и между месечните и дневните ходове на слънчевата активност и геофизичните процеси [61, 101].

- Включени са и редица допълнителни елементи в хода на СА: задръжки [64], колективни ефекти [69], екстремуми [72] и др. Създаден е матричен анализ за изследването на слънчево-земните връзки [76] и е дадено неговото приложение в случаите на прост, сложен и абсолютен анализ, който включва всички елементи на СА [78].

- Изследвано е дефазирането между ходовете на слънчевата активност и на геофизическите процеси [87], като са изведени формули за техните вариации през време на изгревно-залезните периоди, когато измененията са максимални [63].

- Установен е значителен ефект на мажорните слънчеви протонни ерупции през август 1972 и съответните магнитно-йоносферни смущения върху биологичните процеси при здравите хора [99, 101, 102].

- Установено е въздействие на геомагнитния  $A_p$  индекс върху размножителните процеси при животните [159]. Открити са особеностите на влиянията на постоянните и променливи магнитни полета върху биологичните системи [160].

- Намерени са високи коефициенти на корелация между броя на хоспитализираните с инфаркт на миокарда и: 1) геомагнитния  $A_p$  индекс; 2) слънчевия еруптивен индекс; 3) числото на слънчевите петна 4) критичната честота на йоносферата и др. [160].

- Открита е 7-дневна периодичност на заболяванията от инфаркт на миокарда в Република България [106]. Минимумът на случаите е в неделните дни, а в началото и края на работната седмица (понеделник и петък) се наблюдават максимуми.

- Намерено е разпределението на информационните характеристики на редица процеси в космическата физика и слънчево-земните връзки [70, 86].

- Разработваните нови операционни модели CORIMIA (комбиниран с CORSIKA) и CORIAEC са използвани и прилагани за количествена оценка на въздействието на ГКЛ, СКЛ, КП и слънчевата активност върху атмосферното електричество, облакообразуването, времето и климата на Земята. Подчертано е значението на максимума на Пфотцер, където се намира максималната електронна продукция в атмосферата.

## **11. Космическо време и климат - въздействия върху глобалната атмосферна електрическа верига в резултат на мълнии и спрайтове**

39 публикации: 300, 304, 310, 310b, 326, 335, 351, 359, 378, 380, 382, 386, 396, 399, 402, 415, 416, 429, 435, 436, 437, 445, 450, 454, 457, 458, 460, 467, 469, 471, 483, 491, 502, 504, 505, 506, Tonev and Velinov (2016a,b),

- Осъществени са последователни етапи в теоретичното моделиране на квази-електростатичните полета (КСП), които се формират в йоносферата над гръмотевична буря в резултат на мълниев разряд, във връзка с ключовата роля на тези полета при генерация на активно изучаваното в последното десетилетие явление “червен спрайт” във високата атмосфера.

- Тези изследвания са приложени при широко възприетия засега механизъм на възбуждане на спрайт чрез електронно нагряване и конвенционален диелектричен пробив при термални енергии на електроните. Последователно е разработен аналитичен модел на квази-

електростатичните полета генерирани след мълния с постепенно уточняване на възприетите допускания. Моделът е основан на системата уравнения на Максвел при квазистатични условия, като числените резултати са валидни за КСП, не превишаващи интензитета на пробив.

- Изследвано е влиянието на атмосферната проводимост и нейния профил върху изучаваните квази-електростатични полета. Показано е, че пробив се реализира около височината на изравняване на времето на релаксация с времето на разряд [324, 356]. При нощни условия спрайт се реализира много по-лесно (при сравнително по-слаби мълниевии разряди) и на значително по-голяма височина, отколкото при дневни условия, когато той може да възникне само в резултат на изключително мощна положителна мълния.

- Намерени са условията, при които наличието на “коляно” в профила на проводимост в ниската йоносфера влияе върху образуването на горната (дифузна) част на спрайта. Показано е, че електрическото поле се интензифицира около “коляното”, което прави възникване на спрайт по-вероятно. Изведени са условията за достигане на електрическото поле на пробив в ниската йоносфера, свързани с параметрите на разряда и на атмосферната проводимост.

- Теоретично е изследвано възможното влияние на предполагаемите дългопериодични вариации на проводимостта в стратосферата и високата тропосфера в слънчевия цикъл върху честотата на възникване на червен спрайт. Показано е, че в резултат на такива вариации при ниска слънчева активност спрайт може да бъде по-често явление.

- Изчислени са разпределенията на електрическия потенциал на квази-електростатичните полета в ниската йоносфера в резултат на мълния на екваториални ширини с отчитане на анизотропията на проводимост над 70 км и ориентацията на силовите линии на геомагнитното поле.

- Показано е, че на височини 80-95 км максимумът на КСП е отместен в направление запад-изток. На по-голямо хоризонтално разстояние по направление на силовите линии на геомагнитното поле вертикалният градиент на потенциала на КСП обръща знака си.

- Изведени са нови формули за общия (Максвелов) ток и токът на проводимост в областта между гръмотевична буря и йоносферата, съставлящи част от глобалната електрическа верига.

- Показано е, че над гръмотевична буря нощем се формира област на преходно електронно нагряване и модификация на проводимостта. Изведена е самосъгласувана оценка на тази модификация за средни ширини и е показано, че тя е по-голяма при по-стръмен профил на проводимостта.

- Определено е хоризонталното сечение на тази област, което е с със значително по-голям размер в напречно, отколкото в надлъжно направление, особено на екваториални ширини.

- Разработен е числен модел CORIAEC (COsmic Radiation Influence on Atmospheric Electric Circuit - Влияние на космическата радиация върху атмосферната електрическа верига), за оценка на вариациите на електрическите токове и съответните им електрически полета в атмосферните области под 100 km на високи ширини, породени от въздействието на слънчевия вятър върху магнитосферата и йоносферата [435, 436, 445, 454, 457, 458, 460, 464, 472].

## 12. Нови модели на индуцираната йонизация от космическите лъчи CRII (Cosmic Ray Induced Ionization) и приложението им в космическата физика

Понастоящем най-модерното във физиката на космическите лъчи и взаимодействието им с веществото на атмосферата е използването на адронните генератори на Монте Карло. Ние използваме една от най-съвременните програми на Монте Карло: **CORSIKA** (COsmic Ray SIMulations for KAskade). CORSIKA е физически компютърен софтуер за симулиране на индуцираната йонизация от космическите лъчи **CRII** (Cosmic Ray Induced Ionization) - КЛ с висока енергия, т.е. протони и атомни ядра, както и гама-лъчи (фотони), електрони и неутрино.

Използваме и конкуриращата програма **GEANT4** (GEometry ANd Tracking), която е платформа за симулация на преминаване на частици през веществото на атмосферата, използваща също методите Монте Карло. Програмата е създадена от колаборацията GEANT4 на ЦЕРН (Европейската организация за ядрени изследвания CERN), Женева.

В текущата версия програмите CORSIKA и GEANT4 използват адронен модел на взаимодействие QGSJET, който се базира на Теорията на Грибов-Редже, и на модела miniJet за високи

енергии. Адронните взаимодействия при по-ниски енергии са описани от модула FLUKA. Електромагнитните взаимодействия се третират от адаптирана версия на кода EGS4, персонализиран чрез включване на Ефекта на Ландау – Померанчук – Мигдал, подходящ при по-високи енергии. Тези компютърни програми и кодове и техните последни версии са описани по-подробно в съответните публикации.

### **Числени йонизационни модели използващи CORSIKA и GEANT4 за всички височини – от йоносферата до повърхността на Земята**

Публикации: 360, 365, 366, 367, 369, 371, 372, 374, 379, 387, 389, 390, 391, 392, 398, 403, 406, 411, 412, 419, 422, 423, 426, 428, 440, 441, 442, 443, 447, 461, 462, 463, 477, 478, 482, 490, 495, 496, 498-500, 503, Mishev and Velinov (2015a,b,c; 2016a,b; 2017, 2018a,b; 2019, 2020a,b), Velinov and Mishev (2020, 2021), Velinov and Mateev (2014, 2016, 2018, 2019), Dorman, Velinov et al. (2019; 2021a,b),

- Създаден е нов числен модел за взаимодействието на Галактическите Космически Лъчи (ГКЛ) с атмосферата с отчитане на адронните взаимодействия. Моделът е валиден за всички височини на планетните атмосфери - за Земята от високата йоносфера ( $0 \text{ г/см}^2$ ) до повърхността, където дълбочината на атмосферата е  $1033 \text{ г/см}^2$ .

- Моделирана е йонизацията на космическите лъчи в атмосферата като е използван модерния статистически метод Монте Карло. В изследването се използват програмите CORSIKA и GEANT4, които са предназначени за симулиране на ядрено-електромагнитни каскадни процеси в земната атмосфера, породени от космичното лъчение. Програмите се базират на последните теоретични и експериментални резултати за адрон-адронните взаимодействия и дават подробна информация за развитието на широките атмосферни порои, като координати, енергия и време на пристигане на вторичните частици и т.н.

- Получени са йонизационните профили в атмосферата за различни географски ширини и при различни фази на слънчевата активност, използвайки степенния вид на спектъра на първичното космично лъчение. Това разкрива широтната зависимост на планетарната йонизация от ГКЛ. Сравнени са йонизационните профили за слънчев минимум и слънчев максимум.

- Като модел на високоенергийните адронни (ядрени) взаимодействия е използван моделът QGSJET (Quark Gluon String model with JETs), който описва добре ядрените взаимодействия и включва мини-жети (мини-струи), за да представи силните взаимодействия, които са важни при най-високите енергии.

- Изчислена е отделената енергия от основните компоненти на вторичното космично лъчение, като са взети моделите на адрон-адронни взаимодействия QGSJET (за високите енергии) и FLUKA (за ниските енергии) [371, 372, 379]. Изчислен е йонизационният ефект от протони, хелиеви, въглеродни, кислородни и желязни ядра с кинетични енергии 1, 10, 100 GeV и 1 TeV. Направено е сравнение между пораждащите йонизация функции за различни енергии и видове на първичните частици, като подробно са дискутирани и обяснени наблюдаваните разлики. Оценени са приносите на отделните компоненти и ядра в различните слоеве на високата, средна и ниска атмосфера.

- Предложена е параметризация на пораждащата йонизационна функция в атмосферата от космически протони. За тази цел са взети данните, получени с програмата CORSIKA 6.52 като са използвани FLUKA и QGSJET за пораждащата йонизационна функция и усъвършенстваната версия на REGN кода-AFXU (analyse fx=y) за решаване на обратни нелинейни задачи. Използван е съвременен подход за фитиране като решаване на нелинейна обратна задача въз основа на авторегуляризация. Получени са прецизни фитирания за широк клас от разпределения с нелинейни функции.

- Изведени са удобни апроксимации за пораждащата йонизационна функция. Получената параметризация е точна и добре описва максимума на Пфотцер, разположен във височинния интервал 12-18 км, където се наблюдава най-интензивната електронна продукция и озонообразуване от космическите лъчи. Резултатите са сравнени с експериментални данни, като е получено добро съгласие. Предимството на предложената параметризация е, че се използва една функция за всички разпределения. Това позволява прецизна оценка на въздействието на

космичното лъчение върху земната атмосфера в произволни райони и условия и дава възможност да се оцени с голяма точност създадената от космически протони йонизация в атмосферата.

- Получените резултати са от особено важно значение за прецизно изчисляване на йонизационните профили в атмосферата. Тези проблеми са съществени за анализа и изучаването на проблеми свързани с въздействието на ГКЛ върху околоземното пространство, на озоновия слой и другите малки съставки в атмосферата (напр. CO, CO<sub>2</sub> и др.), както и с космическото време и космическия климат. Те са важни също за оценка на радиационния риск на космическите и летателните екипажи.

### Нови модерни подходи и реализации през последните години

- През последните години проблемът за въздействието на космическите енергийни частици върху околоземното пространство се оказа много актуален, поради което няколко екипа разработиха по-усъвършенствани модели, за да оценят възможно най-реалистично възникналите ефекти. Нашият модел – ИКИТ [473, 474, 479-481; Asenovski, Velinov, Mateev (2014, 2016); Velinov (2015a,b; 2016a,b; 2017a,b,c; 2019), Dorman, Velinov, Mishev (2021a,b)] заедно с екипите на Университета в Оулу – УО (Финландия) и на ИЗМИРАН–Москва / Израелски космически център–Тел Авив е сред водещите в света в тази област.

- В последните години се установи трайно сътрудничество между тези три екипа [Dorman, Velinov, Mishev (2018, 2019, 2021a,b)]. Нашият модел отчита реалистично всички ядрено-електромагнитни-лептонни процеси при взаимодействията на космическите лъчи с различните атмосферни области (стратосфера, тропосфера, максимум на Регенер-Пфотцер и др.), както и продукцията на голямо количество вторични частици, отдаващи енергията си главно чрез йонизация.

- В моделите CORSIKA и GEANT4 ползваме най-актуалната версия за високите енергии QGSJET-II-04, която отчита също и нелинейните ефекти на взаимодействие.

- Като ниско енергиен модел за адронните взаимодействия ние използваме модела **FLUKA** (**FLU**ktuierende **KA**skade or **FL**uctuating **C**ascade), който е пакет от процедури за проследяване на енергийни частици през веществото на атмосферата по метода на Монте Карло. В комбинация с CORSIKA и GEANT4 се използва само онази част, която описва ниско-енергийните адронни взаимодействия под 200 GeV. Последната версия FLUKA 2020.0.10 се използва в рамките на CORSIKA и GEANT4 за изчисляване на еластичните адронни сечения с компонентите на въздуха и за определяне на вторичната продукция на частици.

FLUKA е напълно интегриран симулационен пакет от Монте Карло за взаимодействие и транспорт на частици и ядра в атмосферата на Земята.

- И накрая, за да се оцени реално CRП, се нуждаем от надеждни и актуални спектри на ГКЛ и СКЛ. Спектрите използвани от екипите на ИКИТ и УО, се основават на най-новите преки измервания на AMS 02 Voyager (Автоматична Междупланетна Станция Вояджър 2, в момента Автоматична Междузвездна Станция). Спектри са извлечени чрез калибриран метод с директни измервания с космическата сонда PAMELA. В заключение екипите на ИКИТ и УО, работещи по оценка на CRП, са в челните редици на такива проучвания, използвайки най-реалистичните, модерни и прецизни модели и методи.

- Много продуктивен е подхода комбиниращ адронните модели CORSIKA и GEANT4 с електромагнитния модел CORIMIA. Това беше осъществено в серия наши работи [360, 384, 387, 403, 404, 419, 438, 441, 442, 462, 468, 474 и др.]. CORSIKA и GEANT4 изчисляват CRП в тропосферата и ниската стратосфера, докато CORIMIA – във високата стратосфера и йоносферата.

- По този начин у нас е създадено ново научно направление и методология за моделиране и симулация на йонизационните (CRП), електрически и химически процеси в атмосферната и космическата физика с приложение в практиката на прогнозирането на Космическото време.