

Л. Ф. Черногор 

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, Украина  
[leonid.f.chernogor@gmail.com](mailto:leonid.f.chernogor@gmail.com)

## ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ГЕОКОСМИЧЕСКИХ БУРЬ. Часть 1

**Аннотация.** Представлен обзор наших знаний о взаимосвязи солнечно-земных процессов, о проявлениях геокосмических бурь и вариациях атмосферно-космической погоды. Эффекты геокосмических бурь анализируются с позиций системной парадигмы. Системой, в которой развиваются геокосмические бури, является объект Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля (внутренние оболочки) (СМСМИАЗ). Детально рассмотрены геокосмические бури, имевшие место в 2018–2019 гг. Приведены результаты наблюдений эффектов этой бури. Отмечается, что исследование физических эффектов геокосмических бурь – важнейшее научное направление в космической геофизике. Проблема взаимодействия подсистем в системе СМСМИАЗ в течение ГБ – междисциплинарная. Для ее решения требуется системный подход. Проблема носит многофакторный характер. Реакция подсистем определяется одновременным (синергетическим) воздействием ряда возмущающих факторов. Важно, что система СМСМИАЗ – открытая, нелинейная и нестационарная. В ней обнаруживаются прямые и обратные, положительные и отрицательные связи. Ввиду многогранности проявлений геокосмических бурь, из-за уникальности каждой бури изучение физических эффектов геокосмических бурь далеко до завершения. Кроме задач всестороннего исследования физических эффектов геокосмических бурь, во весь рост стоят задачи их детального адекватного моделирования и прогнозирования. Их решение будет способствовать выживанию и устойчивому развитию нашей цивилизации, овладевающей все более совершенными и сложными технологиями. Чем больше будет технологическое развитие землян, тем больше будет уязвима инфраструктура цивилизации к воздействиям солнечных и геокосмических бурь. Предложена классификация ГБ по величине функции Акасофу. Введено шесть типов и предложен индекс ГБ. Предложена классификация ионосферных бурь и возмущений по величине изменения концентрации электронов в максимуме слоя F2. Введено пять типов ИБ. Предложен ионосферный индекс, описывающий интенсивность отрицательных и положительных ионосферных бурь. Предложена классификация ионосферных бурь и возмущений по величине изменения концентрации электронов в нижней ионосфере. Введено шесть типов ПИБ. Предложен соответствующий ионосферный индекс. Установлена физическая схема развития каждой группы ионосферных бурь и возмущений. Показана взаимосвязь магнитной, ионосферной, атмосферной и электрической бурь.

**Ключевые слова:** геокосмическая буря, космическая погода, классификация геокосмических бурь, классификация магнитных бурь, классификация ионосферных бурь, новые ионосферные индексы.

L.F. Chernogor

V.N.Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine  
[leonid.f.chernogor@gmail.com](mailto:leonid.f.chernogor@gmail.com)

## PHYSICAL EFFECTS OF GEOSMOSPHERIC STORM. PART I

**Abstract.** A review of our knowledge about the coupling of solar-terrestrial processes, about manifestations of geospace storms, and about variations in space weather is presented. Space weather effects are analyzed within the system paradigm concept. The system where geospace storms are occur is a Sun–interplanetary medium–magnetosphere–ionosphere–atmosphere–Earth (interior spheres) (SIMMIAE). Geospace storms that occurred on 2018–2019 is examined in detail. Instrument observations of this storm effects are presented. The investigation of the physical effects of geospace storms is noted to be the most important field of study in space geophysics. The problem of subsystem coupling in the SIMMIAE system during a geospace storm is interdisciplinary in nature. Its solution requires an

application of the systems approach. The problem has a multifactor character. The subsystem response is determined by the simultaneous (synergetic) impact of a few disturbing factors. It is important to note that the SIMMIAE system is an open, nonlinear, and nonstationary system. Within this system operate direct coupling and feedback processes, positive and negative linkages. Due to the myriads of manifestations of geospace storms, because of unique nature of each storm, the investigation of physical effects occurring during geospace storms is far from complete. Except for thoroughly investigating the storm physical effects, there is an urgent need to model and forecast the storms adequately and in detail. The solution to these problems will facilitate the survival and steady progress of our civilization relying more and more on new state-of-the-art technology. The more technologically reliant our society is, the more vulnerable the civilization's infrastructure to solar and geospace storm impacts becomes. A classification of geostorms based on Akasofu's epsilon parameter has been advanced. Six types of geostorm have been introduced, and a geostorm index has been suggested. A classification of ionospheric storms and disturbances based on the magnitude of variations in the peak density of the F2 layer has been suggested. Five types of ionospheric storm have been introduced. An ionospheric index characterizing the intensity of negative and positive ionospheric storms has been suggested. A classification of ionospheric storms and disturbances based on the magnitude of variations in the lower-ionosphere electron density has been suggested. Six types of positive ionospheric storm have been introduced. The appropriate ionospheric index has been suggested. The physics-based model of the evolution of each group of ionospheric storms and disturbances has been determined. The linkages among magnetic, ionospheric, and atmospheric storms, as well as electric field disturbances have been shown.

**Keywords:** geospace storm, space weather, geospace storm classification, magnetic storm classification, ionosphere storm classification, new ionospheric indices

**Черногор Л.Ф.**

*В.Н. Каразин атындағы Харьков ұлттық университеті, Харьков, Украина*  
[leonid.f.chernogor@gmail.com](mailto:leonid.f.chernogor@gmail.com)

## ГЕОКОСМИКАЛЫҚ ДҮРІНДІҢ ФИЗИКАЛЫҚ ӘСЕРЛЕРІ. 1 БӨЛІМ

**Аннотация.** Күн мен жердегі процестердің байланысы, геокосмалық дауылдардың көріністері және атмосфералық-ғарыштық ауа-райының өзгеруі туралы біздің білімдерімізге шолу келтірілген. Геокосмикалық дауылдардың әсерлері жүйелік парадигма тұрғысынан талданады. Геокосмостық дауылдар дамиды жүйе Күн - планетааралық орта - магнитосфера - ионосфера - атмосфера - Жер (ішкі қабықшалар) объектісі (SMSMIAS). 2018–2019 жылдары болған геокосмалық дауылдар егжей-тегжейлі қарастырылған. Осы дауылдың әсерін бақылау нәтижелері келтірілген. Геокосмалық дауылдардың физикалық әсерін зерттеу ғарыштық геофизиканың маңызды ғылыми бағыты екендігі атап өтілген. ГБ кезінде SMSMIAS жүйесіндегі ішкі жүйелердің өзара әрекеттесу проблемасы пәнаралық болып табылады. Оны шешу үшін жүйелі тәсіл қажет. Мәселе көп факторлы болып табылады. Ішкі жүйелердің реакциясы бірқатар алаңдаушылық тудыратын факторлардың бір мезгілде (синергетикалық) әсер етуімен анықталады. SMSMIAS жүйесінің ашық, сызықтық және стационар емес болуы маңызды. Ол тікелей және кері, жағымды және жағымсыз байланыстарды ашады. Геокосмостық дауылдардың көпқырлы көріністеріне байланысты, әр дауылдың ерекшелігі болғандықтан, геокосмалық дауылдардың физикалық әсерін зерттеу әлі аяқталмаған. Геокосмостық дауылдардың физикалық әсерлерін жан-жақты зерттеу міндеттерінен басқа, оларды толықтай адекватты модельдеу мен болжау міндеттері толық биіктікте. Оларды шешу өркениеттің өмір сүруіне және орнықты дамуына, одан әрі жетілдірілген және күрделі технологияларды игеруге ықпал етеді. Жердің технологиялық дамуы қаншалықты көп болса, өркениеттің инфрақұрылымы күн мен геокосмикалық дауылдың әсеріне осал болады. Акасофу функциясының шамасына қарай ГБ жіктелуі ұсынылған. Алты түрі енгізіліп, ГБ индексі ұсынылады. Ионосфералық дауылдар мен бұзылыстарды F2 қабатының максимумында электрондар концентрациясының өзгеруі шамасы бойынша жіктеу ұсынылған. Ақпараттық қауіпсіздіктің бес түрі енгізілді. Теріс және оң ионосфералық дауылдардың қарқындылығын сипаттайтын ионосфералық индекс ұсынылған. Ионосфералық дауылдар мен бұзылыстарды төменгі ионосферадағы электрондар концентрациясының өзгеруі шамасына қарай жіктеу ұсынылған. PIV-нің алты түрі енгізілді. Сәйкес ионосфералық индекс ұсынылған. Ионосфералық дауылдар мен бұзылулардың әр тобының дамуының физикалық схемасы құрылды. Магниттік, ионосфералық, атмосфералық және электр дауылдарының өзара байланысы көрсетілген.

**Түйін сөздер:** геокосмалық дауыл, ғарыштық ауа-райы, геокосмалық дауылдардың жіктелуі, магниттік дауылдардың жіктелуі, ионосфералық дауылдардың жіктелуі, жаңа ионосфералық индекстер

## Введение

У истоков солнечно-земной физики и гелиобиологии в первой четверти XX века стоял замечательный русский исследователь А. Л. Чижевский. Он впервые обосновал связь процессов на Солнце с земными процессами, впервые употребил термин «космическая погода», который с 1990-х гг. стал общепринятым. А. Л. Чижевский был убежден, что «...жизнь должна считаться явлением космическим, работой космических сил». Ему принадлежат следующие строки:

«Мы дети Космоса. И наш родимый дом  
Так спаян общностью и неразрывно прочен,  
Что чувствуем себя мы слитыми в одном,  
Что в каждой точке мир – весь мир сосредоточен...»

Идеи А. Л. Чижевского подхвачены целым рядом исследователей.

В начале 1940-х гг. В. И. Вернадский утверждал: «Связь космической реальности с нами гораздо глубже и обыденнее, чем мы думаем». Тем не менее примерно до 1957 г. (до запуска первого ИСЗ) гелиофизика и геофизика шли своими, практически независимыми путями.

В настоящее время проблема геокосмических бурь – важнейшая проблема космофизики и космической геофизики, она является частью проблемы солнечно-земных связей. Общим вопросам, относящимся к этой проблеме, посвящено тысячи научных работ (см., например, [1–63]).

Солнечно-земные связи проявляются во многообразии геоэффективных потоков широкодиапазонного электромагнитного излучения, высокоэнергичных протонов и релятивистских электронов, а также солнечно-земного ветра (солнечной плазмы). Электромагнитное излучение достигает Земли через 8 мин, потоки высокоэнергичных частиц – через время от 20–30 мин до 20–30 ч, потоки плазмы – через 2–4 суток.

Рост интенсивности электромагнитного излучения Солнца (в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах) приводит к увеличению концентрации электронов в ионосфере и, как следствие, к внезапным ионосферным возмущениям (SID), сопровождаемые увеличением поглощения космического радиоизлучения, сигналов гектометрового и декаметрового диапазонов,

фазовым аномалиям сигналов километрового и дециметрового диапазонов и т. п.

Увеличение потоков высокоэнергичных частиц приводит к дополнительной ионизации атмосферы на высотах меньше 100 км, создает повышенную радиационную опасность для космических аппаратов, космонавтов, высотных самолетов.

Возмущения, генерируемые Солнцем, корональные выбросы массы (СМЕ), межпланетные корональные выбросы массы (МСМЕ), коротирующие области взаимодействия (CIR) и ударные волны солнечного происхождения в результате сложного взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем Земли приводят к геокосмическим бурям. Интенсивные бури вызывают не только нарушения радиосвязи, но и сбои в работе линий электропередач, систем навигации, изменения траекторий космических кораблей, влияют на погоду, здоровье людей и состояние всей биосферы Земли.

Геокосмическая буря (ГБ) сопровождается сильными возмущениями геомагнитного поля, ионосферы, верхней атмосферы, геоэлектрического поля магнитосферно-ионосферного происхождения и даже тропосферы, а также земных токов. Возникает взаимодействие двух погодных систем – космической и атмосферной. Поэтому имеет смысл рассматривать атмосферно-космическую погоду в целом.

Освоение геокосмоса, его использование для нужд человечества привело к тому, что повседневная жизнь человека все больше зависит от проявлений солнечно-земных процессов, состояния атмосферно-космической погоды и наземно-космических технологических систем. Все это обуславливает актуальность, большую научную и практическую значимость исследования проявлений солнечно-земных процессов, вариаций атмосферно-космической погоды и эффектов геокосмических бурь во всех геоферах, включая биосферу.

Важно подчеркнуть, что каждая ГБ является уникальным событием, которое характеризуется большим разнообразием физических эффектов, их собственной индивидуальной динамикой.

Исследование геокосмических возмущений и сопутствующих им процессов с це-

лью прогнозирования и предупреждения технологических катастроф стало важным разделом космофизики, космической геофизики, физики солнечно-земных связей. Появилось новое научное направление, ориентированное на всестороннее изучение эффектов геокосмических бурь, моделирование и прогнозирование космической погоды.

Магнитные, ионосферные, атмосферные и электрические бури, представляя собой проявление единого процесса – геокосмической бури, часто охватывают почти всю планету одновременно. Для всестороннего исследования ГБ необходимы хорошо спланированные эксперименты в планетарном масштабе, обмен данными, их совместный анализ. Такое сотрудничество в изучении околоземного пространства осуществляется в рамках крупных международных проектов, использующих современные наземные средства исследования (иозонды, радары некогерентного рассеяния, магнитометры, оптические установки и т. п.) и средства космического базирования (спутники).

Исследованию магнитных и ионосферных бурь, а также сопутствующих им явлений посвящено большое количество работ. Обзоры результатов исследований этих бурь приведены, например, в [14, 30, 33, 60].

К числу международных программ относится программа STEP (Solar-Terrestrial Energy Program), которая с 1990 г. объединяет усилия ученых разных стран в исследовании процессов переноса энергии в системе Солнце – Земля. Проект CEDAR (Coupling, Energetics, and Dynamics of Atmospheric Regions) при поддержке Национального научного фонда США координирует работы по изучению взаимодействия высокоэнергетических и динамических процессов в верхней атмосфере Земли. В соответствии с программой CEDAR Storm Study [64] в течение 1990–1997 гг. проведена серия координированных наблюдений ионосферно-термосферных возмущений на мировой сети радаров некогерентного рассеяния. Эти работы были расширены дополнительными исследованиями в рамках еще одной крупной программы NSWP (National Space Weather Program), направленной на изучение и прогнозирование космической погоды с целью предотвращения сбоев в работе ком-

мерческих и военных систем связи [65]. NSWP включает исследование, анализ и синтез взаимодействия всех элементов системы Солнце–Земля во время геокосмической бури, «от начала до конца» [29]. В программу входит широкий круг проблем: активные процессы на Солнце, солнечный ветер, межпланетная среда, возмущения магнитосферы Земли, ионосферы и термосферы. Аналогичные работы, направленные на моделирование и синтез процессов в системе СМСМИАЗ, проводит международная программа солнечно-земной физики ISTP (International Solar-Terrestrial Physics Program) [66]. Обзор важнейших результатов изучения вариаций космической погоды приведен в [25, 35, 36, 44, 49].

В Европе исследования ионосферных возмущений осуществляет программа PRIME (COST 238) [67]. В соответствии с нею проведен ряд координированных циклов измерений на сети иозондов. Их результаты использованы для разработки ионосферных моделей, дающих информацию об основных физико-химических процессах, определяющих морфологию и динамику ионосферы европейского региона, а также о развитии ионосферно-термосферных возмущений и их распространении в низкие широты во время геокосмических бурь.

Одной из актуальных задач космической геофизики является разработка глобальной справочной модели ионосферы. Такая модель создана совместными усилиями Комитета по космическим исследованиям COSPAR (Committee on Space Research) и Международного радиосоюза URSI (International Union of Radio Science). Это модель IRI (International Reference Ionosphere) [68], которая описывает поведение ионосферы в магнитоспокойных условиях. В настоящее время усилия ученых нацелены на развитие этой модели применительно к возмущенной геокосмическими бурями ионосфере [69].

Интенсивные исследования в течение последнего десятилетия, в том числе в рамках перечисленных программ, значительно продвинули наши знания о взаимосвязи солнечно-земных процессов, проявлениях геокосмических бурь и вариациях космической погоды. Тем не менее, остается много про-

блем в понимании физических процессов, сопутствующих геокосмическим бурям. Дело в том, что каждая буря наряду с общими закономерностями обладает индивидуальными особенностями. Еще сложнее обстоят дела с моделированием и прогнозом этих процессов в глобальных масштабах во всех областях околоземного пространства. Наблюдение каждой ГБ дает ценный вклад в решение стоящих проблем.

Установлено, что геокосмические бури сопровождаются значительными возмущениями геомагнитного поля, атмосферы, ионосферы и электрического поля. Основное энерговыделение имеет место в высоких широтах, что приводит к нагреву термосферы, ее расширению, усилению направленного к экватору нейтрального ветра, генерации перемещающихся атмосферных возмущений (см., например, [70, 71]). Все это изменяет состав термосферы (см., например, [72]). Одновременно с этим имеет место проникновение высокоширотного ионосферного электрического поля в средние и низкие широты (см., например, [73]). Субавроральное электрическое поле усиливается и проникает в экваториальные широты (см., например, [74]). Происходит возмущение электрического поля в динамо-области ионосферы (см., например, [75]). Все это способствует развитию ионосферной бури.

В результате перечисленных процессов наблюдаются синергетическое взаимодействие магнитной, атмосферной, электрической и ионосферной бури (см., например, [76–93]).

Ионосферные бури изучаются более 50 лет (см., например, [2, 94]). Им посвящен ряд работ [2, 5, 24, 30, 43, 65, 95–99]. Статистика бурь представлена в работе [49]. Особенности пространственно-временного распределения эффектов ионосферных бурь описаны в [43, 100]. Моделирование эффектов ионосферных бурь проводилось авторами [21, 96, 101, 102].

Статистика наиболее сильных МБ представлена в работе [103]. Статистические свойства магнитных бурь за 1985–2005 и 1932–2009 гг. обсуждаются в работе [104].

Целью настоящей работы является обзор наших знаний о взаимосвязи солнечно-земных процессов, о проявлениях геокосми-

ческих бурь (ГБ) и вариациях атмосферно-космической погоды. В работе основное внимание уделяется эффектам среднеширотной геокосмической бури, которые изучены значительно меньше, чем эффекты бури в высоких широтах.

### Основные определения

*Геокосмическая буря* (ГБ) представляет собой сильные возмущения геомагнитного поля, динамических процессов радиационных поясов, ионосферы, верхней атмосферы, геоэлектрического поля магнитосферно-ионосферного происхождения и даже тропосферы, а также земных токов. Геокосмическая буря представляет собой совокупность синергетически взаимодействующих между собой магнитной, ионосферной, атмосферной и электрической бури.

*Космическая погода* – физическое и феноменологическое состояния природного космического окружения, включающего Солнце, солнечный ветер и геокосмос (магнитосферу, ионосферу и термосферу), а также их взаимодействие с Землей, биосферой и техносферой. Характерное время вариаций космической погоды изменяется от единиц минут до нескольких суток.

*Космический климат* – усредненное на достаточно большом временном интервале состояние космической погоды.

*Атмосферная погода* – физическое и феноменологическое состояния системы океан – суша – атмосфера (тропосфера и отчасти стратосфера) в каждом месте в каждом интервале времени. Характерное время вариаций атмосферной погоды находится в пределах от единиц часов до недели.

*Атмосферный климат* – усредненное на достаточно большом временном интервале состояние погоды.

*Атмосферно-космическая погода* – физическое и феноменологическое состояния системы, включающей Солнце, солнечный ветер, геокосмос (магнитосферу, радиационные пояса, ионосферу и термосферу), нижнюю атмосферу, океан и сушу, а также их взаимодействие с биосферой и техносферой.

### Эффекты геокосмических бурь

Перечислим кратко основные эффекты, которые возникают в течение геокосмической бури.

1. Воздействие космического излучения на электронное оборудование и экипажи космических аппаратов и самолетов.
2. Изменение орбит космических аппаратов.
3. Индуцирование токов в длинных проводящих системах (ЛЭП, кабельных линиях, трубопроводах и автоматизированных средствах железных дорог).
4. Нарушение условий распространения радиоволн, нарушения в системах телекоммуникации, радиолокации, радионавигации, радиопеленгации и радиоастрономии.
5. Воздействие на погоду- и климатообразующие факторы.
6. Изменение химического состава атмосферы.
7. Воздействие на человека и биосферу в целом.

### **Примеры влияний геокосмических бурь на земную цивилизацию и ее технологическую деятельность**

Приведем несколько примеров, часто обсуждаемых в литературе, свидетельствующих об «уязвимости» современной цивилизации к процессам, сопутствующим геокосмическим бурям (см., например, [59]).

1. 24 марта 1940 г. сильнейшая ГБ стала причиной выхода из строя примерно 80 % всех магистральных телефонных сетей в Миннеаполисе (штат Миннесота, США), нарушения электроснабжения целых районов в штатах Новая Англия, Нью-Йорк, Миннесота, Пенсильвания, Квебек и Онтарио.

2. 9–10 февраля 1958 г. ГБ вызвала нарушения работы телеграфной сети, сделала проблематичной трансатлантическую кабельную связь между Ньюфаундлендом и Шотландией, прервалась связь в Торонто (Канада).

3. 4 августа 1972 г. крайне сильная ГБ вызвала прекращение связи по кабелю между городами Плано и Каскад (США). Также вышел из строя мощный трансформатор на гидроэлектростанции в штате Британская Колумбия (США).

Примечательно, что в один из дней американо-вьетнамской войны, а именно 4 августа 1972 г., произошло уникальное событие: магнитная буря спровоцировала не-

санкционированный подрыв двух десятков магнитных морских мин [105].

4. Сильная ГБ привела к непредвиденно быстрому торможению в атмосфере и падению 11 июля 1979 г. космической лаборатории «Skylab» (США) [<http://neprohgi.livejournal.com/70392.html>]. Подобная участь была уготовлена и для советской орбитальной станции «Салют-5» в июле – августе 1977 г.

5. 13–14 марта 1989 г. сильнейшая ГБ стала причиной выхода из строя системы электроснабжения в Квебеке (Канада) мощностью в 20 ГВт. Электроэнергии лишилось около 3 млн человек. Прервалась связь в декаметровом диапазоне радиоволн. В метровом диапазоне, напротив, резко увеличилась дальность распространения радиоволн, что существенно ухудшило помеховую обстановку. Орбита ряда ИСЗ уменьшилась на 3–7 км.

6. В течение ГБ, имевшей место в конце октября – начале ноября 2003 г., произошли аварии в энергосистеме г. Мальмо (Швеция), в штатах Нью Йорк и Висконсин (США), нарушение функционирования систем телекоммуникаций и GPS-навигации, выход из строя многих ИСЗ разных стран (потеря связи, выход из строя телеметрии, отключение компьютеров и т. п.).

7. 23 мая 1967 г. помехами неизвестной природы (как позднее оказалось, вызванных солнечной бурей) были парализованы натовские радары предупреждения о ракетном нападении и другие военные средства. Военное руководство США посчитало это началом советского ракетно-ядерного удара [62]. В США была объявлена боевая тревога, готовились к вылету бомбардировщики с ядерными боеприпасами и запуск межконтинентальных баллистических ракет США. Мир оказался на грани ядерной катастрофы.

### **Геокосмические бури в свете системной парадигмы**

#### **Основные положения системной парадигмы**

Основные положения системной парадигмы, сформулированные автором на рубеже 1970 – 1980-х гг., сводятся к следующему (см., например, [77–93]).

1. Земля и околоземная среда образуют единую природную систему. Она состоит из подсистем – внутренних и внешних геосфер. При изучении влияния процессов в тектоносфере (землетрясений, вулканизма, наземных и подземных взрывов и т. п.) на внешние геосферы целесообразно рассматривать систему тектоносфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (систему ТАИМ). Учитывая, что около 70 % земной поверхности занимает океан, приходим к необходимости изучения процессов в системе океан – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (системе ОАИМ). Системы ТАИМ и ОАИМ имеет смысл объединить в систему Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (систему ЗАИМ).

Ряд связей между подсистемами уже установлен, они оказались существенными и даже определяющими.

Как и всякий сложный объект, система обладает свойствами иерархии, т. е. имеет упорядоченную многоярусную структуру. Каждая подсистема в свою очередь делится на подсистемы – «подподсистемы»). ЗАИМ как подсистема входит в систему Земля – Солнце, последняя – в Солнечную систему, которая является подсистемой в Галактике и т. д.

При изучении влияния на нашу планету процессов на Солнце, в межпланетной среде и дальнем космосе целесообразно рассматривать систему Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля (систему СМСМИАЗ), а также включить биосферу (Б) и человека в качестве подсистемы в систему СМСМИАЗБ.

2. Между составными частями систем ЗАИМ и СМСМИАЗ имеют место разнообразные связи (прямые и обратные, положительные и отрицательные, комбинации первых и вторых).

3. ЗАИМ, СМСМИАЗ – открытые системы. В них поступает излучение, вещество, энергия и энтропия как «снизу», так и «сверху». Открытые динамические нелинейные системы, находящиеся в метастабильном состоянии, сверхчувствительны к воздействию слабых внешних возмущений и флуктуаций. В таких системах возможны неустойчивости, бифуркации, самоорганиза-

ция, перемежаемость квазидетерминированных и хаотических режимов, триггерные процессы и т. п.

4. ЗАИМ, СМСМИАЗ – динамические системы. Их обобщенные параметры изменяются во времени и пространстве. Поэтому система описывается дифференциальными уравнениями в частных производных с начальными и граничными условиями, заданными с конечной погрешностью.

5. ЗАИМ, СМСМИАЗ – нелинейные системы. Исходные соотношения, описывающие соответствующие физико-химические процессы, являются нелинейными. Это приводит к далеко идущим последствиям при исследовании эволюции систем (к бифуркациям, неустойчивости системы, возникновению хаотических режимов, самоорганизации, появлению упорядоченных структур и т. п.).

6. ЗАИМ, СМСМИАЗ представляют собой природные системы, способные к саморазвитию за счет использования внешних источников энергии, излучения, массы и т. д.

Схематическое строение системы СМСМИАЗ показано на рисунки 1 и 2 [78, 81, 82, 91, 93].

Добавим, что системный подход отчасти используется и другими авторами (см., например, [17, 106–110]).

### Строение систем. Основные процессы

Земля и окружающее ее пространство состоит из геосфер. Внутри планеты выделяют три внутренние геосферы – ядро, мантию и земную кору (литосферу). Толщина литосферы колеблется от 10 км под океанами до 60 км в области горных систем. За сейсмические процессы отвечает верхняя геосфера, именуемая тектоно-сферой. Ее толщина составляет 600–700 км. К внешним геосферам относят атмосферу, ее ионизированную часть – ионосферу, и магнитную оболочку Земли – магнитосферу. В свою очередь атмосфера состоит из целого ряда геосфер – тропосферы, стратосферы, мезосферы и термосферы. В ионосфере выделяют области – D, E и F. Области состоят из слоев C, D, E, E<sub>s</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>. Сложную структуру имеет и магнитосфера (рисунок 1).

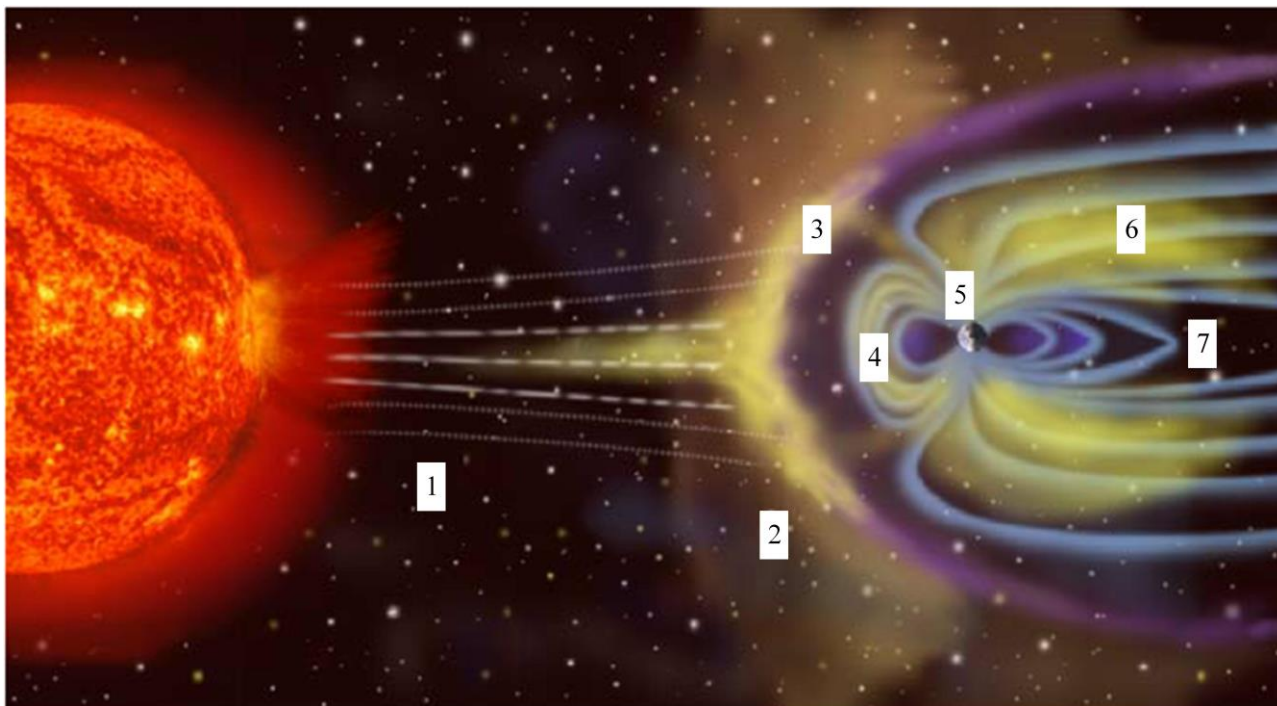


Рисунок 1 – Схема взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли: 1 – солнечный ветер; 2 – магнитопауза; 3 – головная ударная волна; 4 – области захваченной радиации; 5 – зона полярных сияний; 6 – хвост магнитосферы; 7 – нейтральный слой; 8 – касп

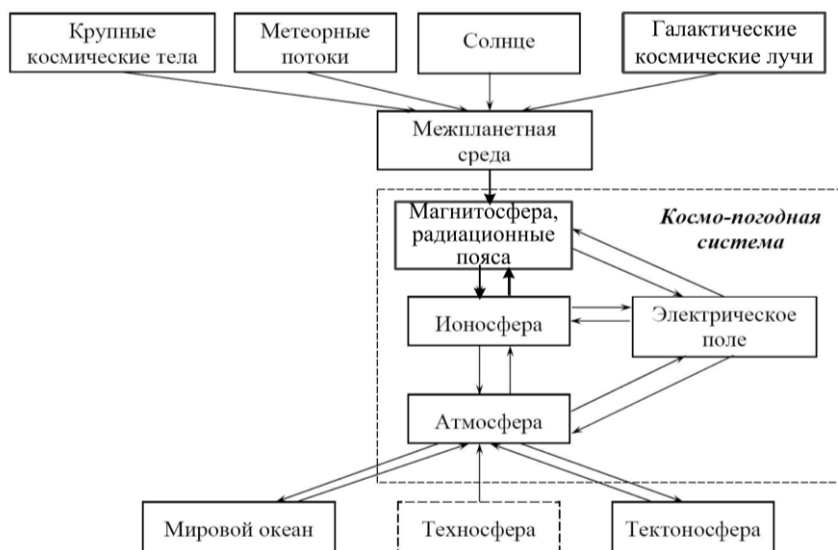


Рисунок 2 – Взаимодействие подсистем в системах СМСМИАЗ и ЗАИМ

Деление на геосферы – условное. На самом деле, Земля и окружающее ее пространство представляют собой единое образование, включающее внутренние и внешние геосферы.

Нижняя граница околоземного космического пространства – геокосмоса – лежит на высоте ~100 км, а на расстоянии  $R \approx 10 R_e$  ( $R_e$  – радиус Земли) геокосмос постепенно переходит в межпланетное пространство. В

области геомагнитного хвоста этот размер не менее  $200 R_e$ .

Учитывая, что на состояние геокосмоса влияют процессы на Солнце, в межпланетной среде и внутри Земли, геокосмосферой будем именовать верхнюю атмосферу, ионосферу и магнитосферу. Геокосмосфера входит в системы ЗАИМ и СМСМИАЗ. Эти системы отражают единство процессов внутри



планеты, на поверхности Земли и в окружающем ее пространстве.

### Процессы в системе СМСМИАЗ

Солнце – главный источник энергии в Солнечной системе. Именно Солнце в основном определяет процессы в геокосмосе. Земля получает от Солнца энергию в виде электромагнитного и корпускулярного излучений, а также в виде солнечного ветра, который, как известно, представляет собой поток плазмы, «погруженной» в магнитное поле солнечного происхождения.

Электромагнитное излучение Солнца наблюдается в диапазоне длин волн  $\lambda$  от  $\sim 10^{-10}$  до 10 м. Максимум энергии излучения приходится на  $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-7}$  м.

Воздействие электромагнитного и корпускулярного излучений Солнца, а также солнечного ветра вызывает взаимодействие подсистем и целый комплекс процессов на Земле (см. рисунки 1, 2), которые изучены в настоящее время недостаточно [28, 111]. Нестационарные процессы на Солнце служат причиной большинства явлений в межпланетной среде, магнитосфере, ионосфере, атмосфере и внутри Земли. Кроме того, они приводят к метеорологическим и биологическим эффектам.

Параметры электромагнитного и корпускулярного излучений Солнца изменяются во время солнечных вспышек, которые вызывают комплекс первичных и вторичных процессов на Земле. К первичным процессам относится рост концентрации электронов в ионосфере, дополнительный нагрев геокосмосферы, изменение прозрачности атмосферы на высотах, где эффективно поглощаются галактические космические лучи и др. Перечень вторичных процессов намного шире. Сюда следует отнести генерацию периодических и аperiodических вариаций геомагнитного и геоэлектрического (магнитосферного, ионосферного и атмосферного) полей, увеличение поглощения космических радиополучений, эффект Форбуша, генерацию свистов, аврорального километрового излучения, шипений, хоров, дискретных эмиссий, электростатических электронных циклотронных эмиссий, плазменных осцилляций головной ударной волны, акустико-

гравитационных волн (АГВ) и многие другие.

К еще более серьезным последствиям приводят СМЕ, вызывающие увеличение плотности, скорости и давления солнечного ветра, «бомбардировку» геокосмоса магнитными облаками и плазмоидами солнечного происхождения. Воздействие этих факторов длится от 10 до 70 ч. В результате такой «бомбардировки» заметно деформируется магнитосфера и до 1–2 % изменяется индукция геомагнитного поля (наступает магнитная буря), нагревается термосфера и ионосфера, в ионосфере в 2–10 раз уменьшается либо существенно (на  $\sim 100$  %) увеличивается концентрация заряженных частиц, изменяется скорость химических реакций и т.д. Подобные процессы в ионосфере именуются ионосферными бурями.

Энергия возмущенного солнечного ветра и магнитных облаков из магнитосферы по силовым линиям проникает в атмосферу в виде электрических полей, потоков частиц, плазмы и, в конечном итоге, тепла. Джоулева диссипация магнитосферных электрических полей и торможение высокоэнергичных частиц приводят к нагреву атмосферы, возмущению системы термосферных ветров, генерации возмущений волновой природы, перестройке химических реакций, вариациям атмосферного электрического поля. Совокупность этих процессов, имеющих значительную энергетику, можно назвать атмосферными бурями. Возмущения параметров геоэлектрического поля могут быть столь существенными, что в этом случае имеет смысл говорить об электрической буре.

Магнитная, ионосферная, атмосферная и электрическая бури представляют собой проявление единого процесса – геокосмической бури. Иначе говоря, геокосмическая буря – синергетически взаимодействующие бури в магнитном поле, ионосфере, атмосфере и электрическом поле магнитосферно-ионосферно-атмосферного происхождения.

В специальной литературе ранее геокосмическая буря называлась магнитной бурей, что, как видно из нашего определения, не совсем так.

Эффекты, вызванные бурями, проявляются сильнее всего в высоких широтах, в несколько меньшей степени – в средних ши-

ротах, но затрагивают также и низкие широты. По высоте эффекты охватывают всю систему ЗАИМ [76, 79, 87].

### Процессы в системе ЗАИМ

Выше перечислены процессы, ответственные за перенос вещества и излучений «сверху». Именно они в основном формируют состояние космической погоды. Состояние атмосферной погоды, как известно, определяется преимущественно процессами в системе ОСА (океан – суша – атмосфера) [63]. В определенной степени на погоду влияют процессы на Солнце, однако этот вопрос в настоящее время мало изучен [12, 19, 31, 112, 113].

Нельзя полностью игнорировать потоки излучений и вещества «снизу» и, в частности, их влияние на погоду и процессы в геокосмосфере. Такие потоки возникают при землетрясениях, извержениях вулканов, грозах, энергичных атмосферных процессах и т. д. [114–117, 124, 126, 129].

В последние десятилетия стало ясно, что на состояние системы ЗАИМ заметно влияет ряд процессов антропогенного происхождения. Дело в том, что энерговооруженность человечества возросла настолько, что мощность и энергия рукотворных объектов, изделий и процессов достигла, а в ряде случаев и превзошла соответствующие параметры многих естественных процессов и источников [89, 114–130]. Поэтому мощные антропогенные воздействия на подсистемы ЗАИМ также должны приниматься во внимание.

Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и в геокосмосе подробно обсуждается в работах [79, 89, 124, 126, 129], а также в разделе 6.

### Процессы в системе СМСМИАЗБ

Биосфера чаще всего рассматривается либо обособленно, либо в качестве подсистемы в системе океан – суша – атмосфера (ОСА). Естественно, что процессы в системе ОСА, как и вариации атмосферной погоды (ВАП), влияют на биосферу и человека в частности.

Известно, что биосфера – объект не только земной, но и космический в том смысле, что она испытывает на себе влияние

космических факторов – гравитации, процессов на Солнце, метеоров, потоков галактических космических лучей и т. д. Иначе говоря, биосфера в качестве подсистемы входит в систему Космос – Земля.

Космические и отчасти земные факторы формируют состояние космической погоды.

В последнее время появились основания утверждать, что обе погодные системы связаны между собой [78, 80–82, 93, 126, 131–133]. Это означает, что на биосферу совместно (синергетически) воздействуют вариации как атмосферной, так и космической погоды.

Каналы воздействия системы ОСА на биосферу изучены недостаточно, хотя сам факт воздействия (в частности, метеочувствительность человека) известен давно. Еще хуже дело обстоит со знанием механизмов влияния вариаций космической погоды (ВКП) на биосферу (человека). Факт же воздействия этих вариаций обсуждается, начиная с XIX века. Высказывания о влиянии космоса на биосферу встречаются в работах В. И. Вернадского – создателя учений о биосфере и ноосфере. Опираясь на результаты исследований своих предшественников, А. Л. Чижевский впервые научно обосновал гипотезу о том, что значительное число солнечных и земных процессов – синхронны (см., например, [9, 84, 134]).

Возможные влияния ВАП и ВКП, воздействие физических полей на биосферу рассматривались многими авторами (см., например, [3, 4, 6, 10, 15, 16, 20, 26, 44, 135–139]). Установлено, что указанные вариации существенно влияют на поведение биосферы, самочувствие и здоровье человека и, по видимому, на социальные процессы. Из-за сложности процессов, многофакторности и синергетичности воздействий в системе Космос – Земля каналы влияния ВАП и ВКП изучены недостаточно. Предыдущим исследователям не доставало системного подхода к изучаемой проблеме. Для выявления механизмов и каналов воздействия ВАП и ВКП необходим системный подход к системе Космос – Земля в целом, к системе СМСМИАЗ и, конечно, включение в эту систему биосферы и человека в качестве подсистемы.

Хорошо известно, что главной причиной ВКП, а отчасти и ВАП являются нестационарные процессы на Солнце. К ним относятся вспышки электромагнитного (рентгеновского, ультрафиолетового, радио-) и корпускулярного излучений, СМЕ, воздействие ударной волны в солнечном ветре, бомбардировка магнитосферы плазменными и магнитными облаками солнечного происхождения.

Схема взаимодействия подсистем в системе СМСМИАЗ показана на рисунке 2. Видно влияние вариаций потока солнечного ветра (солнечной активности) на проявление солнечно-погодных связей (взаимодействие двух погодных систем). Промежуточным звеном служит модуляция потоков галактических космических лучей (ГКЛ).

Как уже отмечалось, нестационарные процессы на Солнце и, прежде всего, СМЕ вызывают геокосмические бури.

Другими, менее интенсивными или более редкими причинами ВКП и ВАП космического происхождения являются метеорные потоки и падения достаточно крупных космических тел.

Метеорные потоки приносят в систему вещество из космоса, формируют в ионосфере пылевую плазму, нагревают верхнюю атмосферу, создают дополнительную ионизацию и, что особенно важно для биосферы, являются источниками инфразвуковых волн.

Падения крупных космических тел способны изменить не только космическую погоду, но и существенно повлиять на космический климат, вызвать эффект «астероидной зимы», кардинально модифицировать биосферу и даже ее уничтожить [95, 106]. Подобные катаклизмы в истории Земли были. К счастью, чем больше размер космического тела, тем реже такие тела сталкиваются с Землей. Например, тела, подобные Тунгусскому, падают на Землю один раз в 100–300 лет.

Падения крупных космических тел сопровождаются генерацией возмущений электрического, магнитного, электромагнитного и инфразвукового полей, существенно воздействующих на биосферу (человека).

### Свойства систем

Свойства открытых динамических нелинейных систем в корне отличаются от поведения линейных систем (см., например, [140, 141]). Перечислим кратко эти свойства.

1. Сложность процессов, множественность их состояний. При переходе из одного состояния в другое система испытывает бифуркацию. Важно, что «других» состояний может быть несколько. В какое из них перейдет система, априори не известно. Структура траекторий в фазовом пространстве часто имеет фрактальные свойства.

2. Благодаря бифуркациям эволюция детерминированной системы характеризуется неоднозначностью. Она может привести к детерминированному (или динамическому) хаосу, в особенности, если система чувствительна к малым изменениям начальных условий [141, 142]. Важно, что такой хаос возникает уже в очень простых, но непременно нелинейных открытых динамических системах. Достаточно, чтобы размерность фазового пространства была не менее трех. С изменением параметров, описывающих состояние системы, хаотические режимы могут перемежаться с детерминированными.

В математическом плане детерминированный хаос является результатом сильной чувствительности решений уравнений, описывающих динамическую систему, от начальных условий. Эта чувствительность получила название бабочки-эффекта (эффекта бабочки). Впервые он был обнаружен при помощи компьютерного моделирования метеопроцессов в атмосфере Э. Лоренцом (см., например, [140, 141]).

3. В определенном смысле, противоположностью детерминированного хаоса является самоорганизация, т. е. возникновение порядка из беспорядка [141]. Процессы самоорганизации изучает синергетика. Как известно, она представляет собой теорию самоорганизации нелинейных открытых диссипативных систем.

Строго говоря, не бывает ни абсолютного хаоса, ни абсолютного порядка. Самоорганизация и деграция – две реализации одного и того же процесса. Система ЗАИМ находится в некотором промежуточном состоянии, ей свойственны как процессы деграции, так и процессы самоорганизации. Последняя обеспечивается, как правило,

диссипацией энергии, вещества и негэнтропии (отрицательной энтропии).

Классическим примером самоорганизации является образование в атмосфере упорядоченной облачной структуры. Подобные структуры в лабораторных условиях называют ячейками Бенара [141].

4. Появление новых свойств у системы (свойство эмерджентности). Ясно, что система имеет свойства подсистем. Нетривиально то, что у нее могут возникать свойства, не присущие подсистемам. Поэтому для адекватного изучения системы требуется системный подход.

5. Спусковые механизмы. Одной из особенностей нелинейных систем является принципиальная возможность проявления спускового (триггерного) механизма высвобождения энергии. При достижении определенного порога энергия, накопленная в одной из подсистем, высвобождается в другой подсистеме. Важно, что энергия возникающих вторичных процессов может быть больше (и даже значительно больше) энергии первичных процессов (см., например, [81, 82, 88, 124]).

### Энергетика процессов

#### Энергетика солнечных процессов

Солнце – основной источник энергии на Земле.

#### Электромагнитное излучение Солнца.

Полная мощность  $P_S$  его излучения составляет около  $4 \cdot 10^{26}$  Вт [143]. Примерно  $4 \cdot 10^{17}$  Вт «перехватывается» нашей планетой. Этой величине  $P_S$  соответствует поток  $1.4 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>. Большая часть  $P_S$  приходится на оптический диапазон (в невозмущенных условиях около  $3 \cdot 10^{17}$  Вт), а на УФ-диапазон –  $4 \cdot 10^{16}$  Вт. Лишь около  $10^{-4}$  части последней затрачивается на ионизацию атмосферы. Мощность рентгеновского излучения порядка  $10^6$  Вт; этого достаточно для обеспечения ионизации основания ионосферы (здесь в дневное время концентрация электронов  $n_{sw} \sim 10^8$  м<sup>-3</sup>).

*Солнечный ветер.* Кроме электромагнитного излучения, от Солнца исходит солнечный ветер, представляющий собой поток плазмы с замороженным в нее магнитным полем. В невозмущенных условиях  $n_{sw} \approx 5 \cdot 10^6$  м<sup>-3</sup>, скорость частиц  $V_{sw} = 3 \cdot 10^5$  м/с. Ветер имеет мощность

$$P_{sw} = n_{sw} V_{sw} \varepsilon_p S_m, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_p \approx 10^{-16}$  Дж – энергия протонов,  $S_m \approx 10^{16}$  м<sup>2</sup> – площадь сечения магнитосферы с характерным размером около  $10 R_e$  ( $R_e$  – радиус Земли). Оценки по соотношению (1) дают  $P_{sw} \approx 10^{12}$  Вт.

В возмущенном солнечном ветре  $n_{sw} \approx 10^7 - 10^8$  м<sup>-3</sup>,  $V_{sw} \approx 10^6$  м/с,  $\varepsilon_p \approx 10^{-15}$  Дж. При этом, как следует из соотношения (1),  $P_{sw} \approx 10^{14} - 10^{15}$  Вт.

Добавим, что энергетика теплового движения частиц в солнечном ветре и межпланетного магнитного поля на 1–2 порядка меньше энергетике кинетического движения.

### Энергетика солнечных и геокосмических бурь

Важными для физики системы СМСМИАЗ (СМСМИАЗБ) являются, в частности, нестационарные процессы на Солнце (солнечные бури). Бури сопровождаются вспышками и СМЕ – мощными проявлениями солнечной активности.

*Энергетика солнечных вспышек.* Энергия сильных вспышек достигает  $10^{25}$  Дж, а мощность –  $10^{22}$  Вт. На орбите Земли вспышкам соответствуют значения порядка  $10^{16}$  Дж,  $10^{13}$  Вт (для площади сечения Земли  $S_e \approx 10^{14}$  м<sup>2</sup>) и  $10^{18}$  Дж,  $10^{15}$  Вт (для  $S_m$ ). Составные этих энергетических характеристик для сильной вспышки приведены в таблице 1. Для слабой вспышки (или субвспышки) эти параметры на 2–3 порядка меньше.

По нашим оценкам, энергия экстремальной солнечной вспышки может составить  $10^{28}$  Дж, а мощность –  $10^{25}$  Вт.

*Энергетика корональных выбросов массы.* Масса выбрасываемого вещества составляет  $10^{12} - 10^{13}$  кг, скорость –  $(1-3) \cdot 10^6$  м/с. Кинетическая энергия выбросов порядка  $10^{24} - 10^{26}$  Дж. При длительности процесса  $10^3 - 10^4$  с его мощность близка к  $10^{20} - 10^{23}$  Вт.

Для экстремального выброса масса составляет  $2 \cdot 10^{14}$  кг, скорость –  $3 \cdot 10^6$  м/с. Тогда кинетическая энергия выброса равна  $10^{27}$  Дж, а мощность –  $10^{23} - 10^{24}$  Вт.

*Энергетика межпланетного магнитного поля.* Эффективность энергетической связи между солнечным ветром и магнито-

сферной описывается при помощи энергетической функции С. И. Акасофу [144]

$$\varepsilon_A = 4S_m V_{sw} \frac{B_{IMP}^2}{\mu_0} \sin^4 \frac{\theta}{2},$$

где  $B_{IMP}$  – индукция межпланетного магнитного поля,  $\theta = \arctg(B_y/B_z)$  – угол поворота вектора индукции относительно плоскости эклиптики,  $\mu_0$  – магнитная постоянная. Полагая  $\sin^2(\theta/2) = 1$ , получим оценку

$$\varepsilon_{Amax} = 4S_m V_{sw} \frac{B_{IMP}^2}{\mu_0}.$$

При  $S_m \approx 10^{16} \text{ м}^2$ ,  $V_{sw} \approx 3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ ,  $B_{IMP} \approx 30 \text{ нТл}$  имеем  $\varepsilon_{Amax} \approx 10^{14} \text{ Дж/с}$ . Часто  $\theta \ll 1$ . Например, при  $\theta/2 = 0.1$  значение  $\varepsilon_A \approx 10^{10} \text{ Дж/с}$ .

*Энергетика геокосмических бурь.* Солнечные бури в окрестности Земли вызывают геокосмические бури. Энергетические характеристики геокосмической бури приведены в таблице 2 [79, 81, 88]. Из таблицы 2 видно, что в процессе бури больше всего изменяется энергия электрического поля во всех внешних оболочках Земли. Существенно также варьируется тепловая энергия ионосферы. Магнитные возмущения обычно невелики, но их роль может быть значительной.

### От бурь на солнце до бурь на земле

#### Солнечные бури. Потоки излучения, частицы и плазмы

Параметры верхней атмосферы Земли и протекающие в ней процессы определяются, главным образом, вариациями поступающей солнечной и магнитосферной энергии [2, 7, 8, 11–13, 23, 32, 39–41, 58]. Эти вариации управляются процессами на Солнце, которые часто сопровождаются солнечными бурями, вспышками и СМЕ. Вспышки возникают над фотосферой, в верхних слоях атмосферы Солнца. Они развиваются на участках со сложной конфигурацией солнечного магнитного поля и обычно привязаны к линии, разделяющей поля с противоположными полярностями. Во время вспышки происходит внезапное разрушение токового слоя, разделяющего противоположно направленные магнитные поля, которое сопровождается взрывным выделением значи-

тельного количества энергии ( $10^{25}$ – $10^{26}$  Дж) за сравнительно короткое время ( $\sim 10^3$  с).

Оптически буря проявляется как внезапное увеличение яркости излучения в линии  $H_\alpha$  солнечного спектра, а иногда и в видимой его части. Этот эффект называют солнечной вспышкой, но это только одно из многих сложных явлений, связанных с солнечной бурей. Вспышка сопровождается интенсивным электромагнитным излучением: рентгеновским, ультрафиолетовым и радиоизлучением. Электромагнитное излучение Солнца достигает ионосферы Земли примерно через 8 мин после вспышки и вызывает внезапные ионосферные возмущения (ВИБ). Они проявляются в увеличении ионизации в D- и E-областях на всей освещенной стороне Земли, преимущественно за счет возрастания интенсивности рентгеновского излучения (в десятки и сотни раз), что приводит к поглощению отраженных от слоев E и F сигналов декаметрового радиодиапазона, и вызывает их замирание, или фединг.

Солнечные вспышки – это наиболее бурные явления, связанные с центром активной области Солнца. Однако, в различных частях солнечного диска постоянно развиваются и затухают несколько центров активности. В каждой секторной структуре непрерывно изменяются плотность солнечного ветра, его скорость и напряженность межпланетного магнитного поля. Такие изменения также могут вызывать магнитные бури и связанные с ними возмущения магнитного и электрического полей Земли, ионосферы и термосферы. Как уже отмечалось, эти возмущения в системе Солнце – Земля представляют собой цепочку взаимосвязанных событий единого процесса – геокосмической бури. Энергетика этих возмущений велика (см. таблицу 2).

Если развитие неустойчивости на Солнце происходит в токовом слое, который разделяет незамкнутые силовые линии, соединяющие фотосферу с солнечным ветром, происходит выброс из Солнца энергичных протонов с энергиями от  $\sim 1$  кэВ до более чем 10 ГэВ. Такие вспышки называют протонными. Они приводят к солнечным протонным явлениям. Высокоэнергичные протоны проходят расстояние до Земли за время

от десятков минут до нескольких часов в зависимости от их энергии и траектории распространения от Солнца к Земле. В результате магнитосфера Земли оказывается окруженной потоком энергичных частиц. Часть их вторгается в полярную атмосферу, ионизирует ее на высотах D-области и вызывает поглощение в полярной шапке (ППШ), которое нарушает прохождение радиоволн вплоть до полного прекращения радиосвязи (блэкаут).

### Бури в межпланетной среде

За энергичными частицами следует облако солнечной плазмы, которое пересекает межпланетное пространство со скоростью ~500–1500 км/с и достигает земной орбиты за 30–40 ч. Плазменное облако несколько опережает межпланетная ударная волна, генерируемая в солнечном ветре, интенсивность которого во время бури также резко возрастает. При столкновении межпланетной ударной волны и солнечной плазмы с магнитосферой Земли начинается магнитная буря (буря в магнитосфере). Энергетические характеристики источников, связанных с геокосмической бурей, приведены в таблице 3.

### Магнитные бури

Типичная магнитная буря состоит из трех фаз [2, 7, 8, 11–13, 23, 32, 39–41]. Она начинается в момент времени, когда межпланетная ударная волна достигает магнитосферы и воздействует на нее. Результатом взаимодействия является модификация ударных волн, изменение параметров потока на фронте волны, возмущение системы электрических токов, текущих по магнитопаузе, и сжатие (компрессия) магнитосферы. Эффект компрессии проявляется в сдвиге положения головной ударной волны в сторону Земли на несколько планетных радиусов и, как результат, в резком увеличении напряженности магнитного поля на поверхности Земли и в магнитосфере. Описанные эффекты относятся к начальной фазе магнитосферной бури. После внезапного начала бури, как правило, следует довольно спокойный период продолжительностью от нескольких минут до нескольких часов.

Главная фаза бури начинается тогда, когда магнитосферы достигают возмущения, сгенерированные солнечной бурей, приводящие к началу распада кольцевого тока. Соответствующий интервал времени определяется по интервалу времени, где индекс  $D_{st} > 0$ . Главная фаза характеризуется последовательностью взрывоподобных процессов, называемых магнитосферными суббуриями. Они связаны с турбулентностью плазменного облака и иррегулярностью северо-южной компоненты переносимого им межпланетного магнитного поля (ММП) с индукцией  $\mathbf{V}$ . При южной ориентации вектора  $\mathbf{V}$  происходит пересоединение силовых линий ММП и земного магнитного поля, что приводит к появлению электрического поля  $\mathbf{E}$ , направленного поперек хвоста магнитосферы с утренней ее стороны к вечерней.

Электрическое поле  $\mathbf{E}$  вызывает интенсивное, направленное к Солнцу конвективное движение плазмы в хвосте и в плазмосфере. В хвосте происходит перераспределение плазмы, магнитного поля и токов. Токи, направленные из хвоста магнитосферы, приводят к усилению полярной электроструи и электрического тока, текущего вдоль овала полярных сияний. Конвекция магнитосферной плазмы к Земле и токи вдоль силовых линий приводят к ускорению заряженных частиц. Возникает чрезвычайно горячая плазма с температурой около  $10^7$  К и более. Часть ее вторгается в верхнюю атмосферу высоких широт. Другая часть проникает в плазменный слой, частично инжектируется в область захвата и заполняет во время бури радиационные пояса: протонный пояс (так называемый кольцевой ток) и внешний радиационный пояс (электронный). Захваченные частицы (протоны и электроны) в поясах имеют большие энергии. Последовательность нескольких суббурь приводит к генерации интенсивного кольцевого тока, магнитное поле которого ответственно за понижение горизонтальной  $H$ -компоненты геомагнитного поля и формирование главной фазы бури.

Горячая плазма, инжектируемая в высокоширотные области, возмущает полярную ионосферу и вызывает полярные суббури. Вторжение в атмосферу энергичных частиц сопровождается полярными сияниями –

свечением ионосферы на высотах 100–150 км. Область, занимаемая полярными сияниями, окружает геомагнитный полюс в виде полярного овала (геомагнитная широта  $\sim 68^\circ - 78^\circ$ ). Высыпание из магнитосферы электронов с энергиями  $E_e \geq 20$  кэВ вызывает дополнительную ионизацию в области D и так называемое авроральное поглощение радиоволн. Область аврорального поглощения смещена в сторону средних широт по сравнению с зоной полярных сияний. Как и все авроральные явления, с ростом магнитной активности она смещается к экватору.

Возмущения из высоких широт распространяются в средние и низкие широты. Расширение высокоширотной области ионосферы, охваченной конвекцией, ведет к уменьшению размера плазмосферы и к смещению на более низкие геомагнитные широты главного ионосферного провала. Усиление и приближение к Земле кольцевого тока в главную фазу бури сопровождается увеличением потоков тепла в ионосферу из периферийной «горячей зоны» плазмосферы, где температура плазмы составляет несколько десятков тысяч кельвинов. Ее существование обусловлено взаимодействием энергичных протонов кольцевого тока с холодной фоновой плазмой посредством возбуждения и диссипации ионно-циклотронных волн. Приток тепла к электронному газу области F ионосферы увеличивает его температуру, а также расходуется на возбуждение электронных состояний атомов кислорода с последующим их высвечиванием (красные дуги) и на возбуждение колебательных уровней молекул азота. Последний процесс ускоряет химическую реакцию, ответственную за потерю ионов кислорода, доминирующих в области F, и приводит к уменьшению электронной концентрации в этой области.

Усиление электрических полей и повышение проводимости за счет высыпаний энергичных частиц во время магнитных бурь обуславливают возрастание токов в высокоширотной ионосфере и джоулев нагрев заряженных и нейтральных компонент атмосферы. Пространственная неоднородность и нестационарность нагрева нейтрального газа ведут к генерации движений различных масштабов (ветров и внутренних гравитационных волн – ВГВ). Они вызывают пере-

стройку глобальной термосферной циркуляции и изменяют нейтральный состав, повышая относительное содержание молекулярных компонент термосферы в средних широтах. Это обстоятельство совместно с увеличением ионной температуры и температуры нейтрального газа ускоряет потери ионов кислорода, что ведет к значительному падению электронной концентрации в области F и развитию отрицательной ионосферной бури. Кроме того, во время возмущений магнитосферные электрические поля могут проникать из полярных широт в средние и низкие широты, нарушая процессы вертикального переноса плазмы и вызывая ее перераспределение. Так процессы в высокоширотной ионосфере влияют на поведение плазмы на значительном удалении от нее.

Начальная и главная фазы магнитной бури сопровождаются генерацией спорадического радиоизлучения (см., например, [145]).

После главной фазы бури наступает фаза восстановления. По мере ослабления притока энергичных частиц в область захвата кольцевой ток постепенно уменьшается. В течение одного-двух дней частицы могут как ускоряться, так и выводиться из радиационных поясов [146]. Геомагнитное поле постепенно возвращается к своему обычному значению. Характер протекания геомагнитных бурь весьма разнообразен. Отдельные фазы бури могут иметь различную продолжительность либо вообще отсутствовать.

### Энергетика магнитной бури

Оценим энергетику магнитной бури. Ее энергия  $E_{ms}$  определяется значением индекса  $D_{st\min}^*$  [22]:

$$E_{ms} = \frac{3}{2} E_m \frac{|D_{st\min}^*|}{B_0}, \quad (2)$$

где  $B_0 \approx 3 \cdot 10^{-5}$  Тл – значение индукции магнитного поля на экваторе,  $E_m \approx 8 \cdot 10^{17}$  Дж – энергия дипольного магнитного поля Земли. Скорректированное значение

$$D_{st\min}^* = D_{st\min} - bp_{sw}^{1/2} + c. \quad (3)$$

Здесь  $b = 5 \cdot 10^5$  нТл/(Дж·м<sup>-3</sup>)<sup>1/2</sup>,  $c = 20$  нТл,  $p_{sw} = n_p m_p V_{sw}^2$ ,  $n_p$  и  $m_p$  – концентрация и масса протонов,  $V_{sw}$  – скорость солнечного ветра.

Для крайне сильной бури (по классификации [78–82, 88, 91]) или экстремальной магнитной бури (по классификации NOAA) при  $D_{st\min} \approx -600$  нТл,  $n_p \approx 10^8 \text{ м}^{-3}$ ,  $V_{sw} \approx 1500$  км/с имеем  $p_{sw} \approx 4 \cdot 10^{-7}$  Дж/м<sup>3</sup>. При этом из соотношений (2) и (3) получаем, что  $D_{st\min}^* \approx -900$  нТл,  $E_{ms} \approx 3.6 \cdot 10^{16}$  Дж. Можно грубо полагать, что  $D_{st\min}^* \approx 3D_{st\min} / 2$ . Энергия крайне сильной магнитной бури эквивалентна энергии термоядерной бомбы в 10 Мт ТНТ. Если длительность основной фазы  $\Delta t = 6$  ч, то мощность бури  $P_{ms} \approx 1.7 \cdot 10^{12}$  Вт.

### Статистика ионосферных бурь

В работе [147] проведены исследования статистических свойств ИБ за два цикла СА (с 1985 по 2005 гг.). Все бури разделены на пять типов:  $P$  – бури (положительные);  $N$  – бури (отрицательные); двухфазные  $PN$  – бури (сначала положительная, а затем отрицательная фаза);  $NP$  – бури (сначала отрицательная, а затем положительная фаза);  $NS$  – буря (незначительная). Для анализа авторы [147] выбрали две станции в США и Японии соответственно: Boulder (40° с.ш., 105.3° з.д., магнитная широта – 47.4° с.ш.) и Kokubunji (35.7° с.ш., 139.5° в.д., магнитная широта – 26.8° с.ш.).

Результаты наблюдений приведены в таблицах 7 и 8. Из таблиц видно, что число  $P$ -бурь было около 25 и 50 %, а  $N$ -бурь – 45 и 20 % для станций Boulder и Kokubunji соответственно. Для этих же станций число  $PN$ -бурь составляло около 11 и 12 %,  $NP$ -бурь – 3.5 и 2.3 %. Число незначительных бурь не превышало 14 и 18 % соответственно для станций Boulder и Kokubunji. Появляемость ИБ различных типов существенно зависела от времени суток (см. табл. 4 и 5).

Важным результатом работы [147] является то, что интенсивность ИБ определяется не столько интенсивностью МБ, сколько исходным состоянием ионосферы.

Добавим, что, несмотря на значительные успехи в изучении ИБ, механизмы возникновения ПИБ до конца не понятны [94].

### Классификация бурь и ионосферный индекс

В основу классификации ИБ автором положена величина уменьшения концентрации электронов во время отрицательных ИБ, которое достигает 10 раз. Положительные ИБ характеризуются сравнительно небольшим (примерно до 3 раз) увеличением  $N$ .

Для количественной характеристики отрицательных ионосферных бурь (ОИБ), по-английски negative ionospheric storms (NIS), целесообразно ввести ионосферный индекс

$$I_{NIS} = 10 \lg \frac{N_{m0}}{N_{m\min}}, \quad (4)$$

где  $N_{m0}$  и  $N_{m\min}$  – невозмущенные и возмущенные значения  $N$  в максимуме слоя F2. Характеристики ОИБ (отрицательных ионосферных возмущений) приведены в таблице 6.

Перейдем теперь к классификации положительных ионосферных бурь (ПИБ), по-английски positive ionospheric storms (PIS). Во время ПИБ концентрация электронов  $N_{\max}$  в F-области ионосферы может увеличиваться примерно до 3 раз (см., например, [147]).

По аналогии с выражением (4) введем индекс ПИБ

$$I_{PIS} = 10 \lg \frac{N_{\max}}{N_0}. \quad (5)$$

Характеристики ПИБ приведены в таблице 7.

Основные эффекты ГБ в нижней ионосфере описаны книге [79], а также в ряде работ других авторов (см., например, [148]). Во время ГБ в D-области ионосферы наблюдается увеличение концентрации электронов, которое определяется временными и пространственными особенностями высыпаний высокоэнергичных ( $E_e \sim 10\text{--}100$  кэВ) электронов или протонов ( $E_p \sim 10\text{--}100$  МэВ). Важно, что высыпания электронов (из внутреннего радиационного пояса) имеют место в средних широтах, где параметр Мак-Илвейна  $L \approx 2$  [51, 148]. Фоновое значение плотности потока электронов  $\Pi_e \approx 10^5 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$  (см., например, [148]). Во время ГБ  $\Pi_e \approx 10^8 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [148]. При таких  $\Pi_e$  концентрация электронов в D-области ионосферы увеличивается на 1–2 порядка в дневное время и на 1–3 порядка в ночное время.



Автором [148] дана классификация МБ, основанная на проявлениях бурь в  $D$ -области ионосферы, определяемых популяциями высокоэнергичных электронов. Выделено три типа: МБ1, МБ2 и МБ3. относительная частота проявления таких бурь близка к 50, 30 и 20 % соответственно. Важно, что интенсивность ИБ в  $D$ -области ионосферы зависит не от силы МБ (значений  $D_{st}^{min}$ ), а от популяции электронов в радиационном поясе.

За счет высыпания частиц концентрация электронов в  $E$ -области ионосферы может увеличиваться до порядка ночью, а днем – не более чем на 10 %.

Увеличение  $N$  в  $D$ - и  $E$ -областях также можно относить к эффектам ПИБ.

Для описания увеличения  $N$  в  $D$ - и  $E$ -областях ионосферы также можно воспользоваться индексом, который дается соотношением (5).

При этом в  $D$ -области ионосферы  $I_{PIB}$  изменяется примерно от 1 до 25 и более (табл. 8). В  $E$ -области ионосферы обычно  $I_{PIB} \leq 3-5$ .

### Статистика магнитных бурь

Как известно, с увеличением  $K_p$  число МБ  $n_{ms}$  быстро уменьшается. Автором построены корреляционные поля « $n_{ms}-K_p$ », « $n_{ms}-|D_{st}|$ » и получена регрессионная зависимость для  $K_p = 4 - 8$  и  $K_p > 8$ . При  $K_p = 4 - 8$  предлагается следующая аппроксимация

$$\lg n_{ms} = -0.4 (K_p - 4) + 3.6. \quad (6)$$

При  $K_p > 8$  скорость убывания  $n_{ms}$  увеличивается, но при этом резко уменьшается и количество МБ, а значит и их статистика (массив данных).

В течение цикла СА при  $K_p = 9$  число  $n_{ms} = 2 - 4$ .

При  $K_p \geq 9$  предлагается следующая зависимость  $n_{ms}$  от  $K_p$ :

$$\lg n_{ms} = -a(K_p - 8) + 2, \quad (7)$$

где  $a = 1.5 \pm 0.2$ .

Если  $a = 1.5$ , то, как следует из (7), средний интервал времени  $\Delta T$  между МБ с  $K_p$ , равном 10, составляет около 110 лет. При  $K_p = 11$  прогнозируемое значение  $\Delta T \approx 3500$  лет.

Получим регрессионную зависимость числа МБ  $n$  за цикл СА в зависимости от минимального значения  $D_{st}$ -индекса. В каче-

стве исходных возьмем результаты наблюдений в течение семи циклов СА, выполненных авторами [149]. Результаты наблюдений сведены в таблице 9.

Для  $|D_{st}| = 50 - 520$  нТл автором предлагается следующая регрессионная зависимость

$$\lg n_{ms} = -2.67 \lg |D_{st}| + 7.27, \quad (8)$$

а для  $|D_{st}| = 520 - 2600$  нТл –

$$\lg n_{ms} = -3.45 \lg |D_{st}| + 9.38. \quad (9)$$

Из соотношений (8) и (9) следует, что при  $|D_{st}| \approx 360 - 680$  нТл наблюдается излом в регрессионной зависимости. Этому значению  $D_{st}$ -индекса соответствует  $K_p \approx 8$ . Именно при  $K_p \approx 8$  имеет место излом также в регрессионной зависимости  $n_{ms}(K_p)$  (см. соотношения (6) и (7)).

Представляет определенный интерес классификация ионосферных возмущений, приведенная в работе [150]. В этой работе введен индекс ионосферной активности.

### Классификация магнитных бурь

Классификация МБ проводится по их интенсивности, характеру и величине относительных возмущений параметров среды. В таблице 10 приведена классификация МБ по  $K_p$ - и  $D_{st}^*$ -индексам, предложенная в работах [78–82, 85, 86, 88], по уровню геомагнитной активности и значениям энергетических параметров. Магнитным бурям соответствуют значения  $K_p \geq 3$  и  $|D_{st}^*| \geq 10 - 20$  нТл. Индексы  $K_p < 2$  и  $|D_{st}^*| < 5 - 10$  нТл соответствуют магнитным возмущениям.

В таблице 11 дана характеристика МБ по классификации NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) Space Weather Scales (см. [http://www.sec.noaa.gov]). Она введена с целью оповещения общественности о состоянии космической погоды и ее воздействии на людей и технологические системы. Каждому типу МБ присваивается уровень, аналогично ураганам, торнадо, землетрясениям. Рассматриваются воздействия МБ на энергетические системы, космические аппараты (КА) и другие системы. В классификации также указывается, как часто случаются МБ в 11-тилетнем цикле солнечной активности (СА).

Таблица 11 дополнена автором для возможных значений  $K_p$ , равных 10, 11 (табл. 12).

Магнитные бури можно также классифицировать по величине индекса  $D_{st}^*$  (табл. 10) (см. также [78–81, 89]). Определенным значениям  $D_{st}^*$ -индекса соответствуют значения  $K_p$ -индекса, изменяющегося от 0 до 11. В отличие от классификации NOAA (табл. 14), в таблице 10 содержатся данные при  $K_p < 5$  и  $K_p > 9$ . Главное отличие состоит в том, что классификация по индексу  $D_{st}^*$  позволяет указать энергию и мощность магнитных бурь. Такая классификация предпочтительна для космической геофизики. Классификация NOAA удобна для потребителей сведений о состоянии космической погоды.

Заслуживает также внимания классификация МБ, описанная в [27]. В этой работе описаны статистические свойства МБ.

### Классификация геокосмических бурь

Предложенную автором классификацию геокосмических бурь целесообразно производить по величине энергии, передаваемой солнечным ветром магнитосфере в единицу времени. Мерой этой энергии служит функция Акасофу  $\varepsilon_A$  [144].

Введем в рассмотрение индекс ГБ

$$G_{st} = 10 \lg \frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_{Amin}},$$

где  $\varepsilon_{Amin} = 20$  ГВт – пороговое значение функции Акасофу (при котором возмущение в геокосмосе может считаться ГБ). Тип ГБ будем обозначать GSSI1, GSSI2 и т. д. (GSSI – Geospace Storm Index). Характеристики ГБ приведены в таблице 13. Из таблицы 13 видно, что слабой буре соответствует  $G_{st} = 0$ , а крайне сильной – 21 дБ.

### Основные результаты

1. Исследование физических эффектов геокосмических бурь относится к важнейшим научным направлениям в космической геофизике.
2. Проблема взаимодействия подсистем в системе СМСМИАЗ в течение ГБ является междисциплинарной. Она может быть решена с привлечением системного подхода. Проблема носит многофакторный характер.

Реакция подсистем определяется синергетическим воздействием целого ряда возмущающих факторов. Решение проблемы усугубляется тем, что система СМСМИАЗ относится к открытым, нелинейным и нестационарным системам. В ней выявлены прямые и обратные, положительные и отрицательные связи.

3. В качестве примера приведено описание особенностей четырех геокосмических бурь, имевших место в 2018–2019 гг. Продемонстрировано многообразие их проявлений. Ввиду многогранности проявлений геокосмических бурь, из-за относительной индивидуальности и уникальности каждой бури изучение физических эффектов геокосмических бурь далеко до завершения.

4. Наряду со всесторонним исследованием физических эффектов геокосмических бурь, требуется их детальное и адекватное моделирование и прогнозирование. Решение этих задач будет способствовать выживанию и устойчивому развитию земной цивилизации, овладевающей все более совершенными и сложными технологиями. Опыт последних десятилетий показывает, что чем большими будут технологические достижения землян, тем больше будет уязвима их инфраструктура к воздействиям солнечных и геокосмических бурь.

5. Предложена классификация ГБ по величине функции Акасофу. Введено шесть типов и предложен индекс ГБ.

6. Предложена классификация ионосферных бурь и возмущений по величине изменения концентрации электронов в максимуме слоя F2. Введено пять типов ИБ. Предложен ионосферный индекс, описывающий интенсивность отрицательных и положительных ионосферных бурь.

7. Предложена классификация ионосферных бурь и возмущений по величине изменения концентрации электронов в нижней ионосфере. Введено шесть типов ПИБ. Предложен соответствующий ионосферный индекс.

8. Установлена физическая схема развития каждой группы ионосферных бурь и возмущений. Показана тесная взаимосвязь магнитной, ионосферной, атмосферной и электрической бурь. Продемонстрировано, что магнитную, ионосферную, атмосферную и электрическую бури следует рассматривать

как проявления единого сложного и многогранного процесса, названного геокосмической бурей.

### Литература

1. Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms // *J. Geophys. Res.* – 1959. – **64**. – P. 305–321.
2. Солнечно-земная физика / пер. с англ. под ред. И. А. Жулина, Г. А. Скуридина. – М.: Мир. – 1968. – 428 с.
3. Дружинин И. П., Хамьянова Н. Р. Солнечная активность и переломы хода природных процессов на Земле. – М.: Наука. – 1969. – 224 с.
4. Масамуро Широ. Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли. – М.: Наука. – 1971. – 209 с.
5. Matuura N. Theoretical models of ionospheric storms // *Space Sci. Rev.* – 1972. – **13**. – P. 124–189.
6. Дубров А. П. Геомагнитное поле и жизнь. – Л.: Гидрометеиздат. – 1974. – 176 с.
7. Акасофу С.-И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Ч. 1. – М.: Мир. – 1974. – 384 с.
8. Акасофу С.-И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Ч. 2. – М.: Мир. – 1975. – 512 с.
9. Чижевский А. Л. Земное эхо солнечных бурь. – М.: Мысль, 1976. – 367 с.
10. Проблемы гелиобиологии. – Новосибирск: Новосибирский гос. мед. институт, 1977. – 102 с.
11. Мирошниченко Л. И. Солнечная активность и Земля. – М.: Наука. – 1981. – 144 с.
12. Солнечно-земные связи, погода и климат / под ред. Б. Мак-Кормака, Т. Селиги. – М.: Мир. – 1982. – 376 с.
13. Витинский Ю. И. Солнечная активность. – М.: Наука. – 1983. – 193 с.
14. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор) // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 1985. – **25**, № 5. – С. 705–721.
15. Сидякин В. Т., Темурьянц Н. А., Макеев В. Б., Владимирский Б. М. Космическая экология. – К.: Наукова думка. – 1985. – 176 с.
16. Мизун Ю. Г. Космос и погода. – М.: Наука. – 1986. – 144 с.
17. Данилов А. Д., Казимировский Э. С., Вергасова Г. В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере – Л.: Гидрометеиздат. – 1987. – 269 с.
18. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука. – 1988. – 528 с.
19. Пудовкин М. И., Распопов О. М. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры (обзор) // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 1992. – **32**, № 5. – С. 1–22.
20. Хаснулин В. И. Космические тайны вашего самочувствия / В. И. Хаснулин. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. – 1992. – 176 с.
21. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Moffett R. J., Quegan S. Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* – 1994. – **99**. – P. 3893–3914.
22. Prolss 1993 (KNiT)
23. Kivelson M. G., Russell Ch. T. Introduction to Space Physics // Cambridge: Cambridge Atmospheric & Space Science Series. – 1995. – 568 p.
24. Prölss G. W. Ionospheric F region storms, in Handbook of Atmospheric Electrodynamics, edited by H. Volland / 1995. – P. 195–248, CRC Press, Boca Raton, Fla.
25. Schunk R. W., Sojka J. J. Ionosphere-Thermosphere Space Weather Issues // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1996. – **58**. – Pp. 1527–1574.
26. Мизун Ю. Г. Космос и здоровье. – М.: ВЕЧЕ, АСТ. – 1997. – 608 с.
27. Loewe C. A., Prolss G. W. Classification and mean behavior of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* – 1997. – **102**. – P.14209–14213.
28. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Roble R. G., Richmond A. D. How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm? Magnetic storms / In red. Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Kamide Y., Arballo J. K. – Geophysical monograph series. – **98**. – American Geophysical Union, Washington, D.C. – 1998. – Pp. 203–225.
29. Knipp D. J., Crooker N., Engebretson M., Li X., McAllister A. H., Mukai T., Kokubun S., Reeves G. D., Obara T., Weatherwax A. N., Emery B. A. An Overview of the Early November 1993 Geomagnetic Storm // *J. Geophys. Res.* – 1998. – **103**. – P. 26,197–26,220.
30. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms-a Review // *Space Science Reviews.* – 1999. – **88**. – Pp. 563–601.

31. Авдюшин С. И., Данилов А. Д. Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему (обзор) // Геомагнетизм и аэронаомия. – 2000. – **40**, № 5. – С. 3–14.
32. Владимирский Б. М., Темурьянц Н. А. Влияние солнечной активности на биосферу-ноосферу – М.: МНЭПУ. – 2000. – 374 с.
33. Danilov A. D., Lastovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // *Inter. J. Geomagn. Aeron.* – 2001. – **2**, № 3. – Pp. 209–224.
34. Freeman J. W. *Storms in Space.* – Cambridge University Press, London, New York. – 2001.
35. *Space Storms and Space Weather Hazards* / In ed. Daglis, I. A. – Springer-Verlag New York. – 2001. ISBN 1-4020-0031-6.
36. *Space Weather (Geophysical Monograph).* / In ed. Song, P., Singer, H., Siscoe, G. – Union, Washington, D.C. – 2001. ISBN 0-87590-984-1.
37. Carlowicz, M. J., Lopez R. E. *Storms from the Sun.* – Joseph Henry Press, Washington DC. – 2002. ISBN 0-309-07642-0.
38. Lathuillère C., Menvielle M., Lilensten J., Amari T., Radicella S. M. From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: an overview of scientific models available for space weather developments // *Annales Geophysicae.* – 2002. – **20**, N. 7. – Pp. 1081–1104.
39. Benestad R. E. *Solar activity and earth's climate.* – Springer-Praxis. – 2002. – 287 p.
40. Владимирский Б. М., Темурьянц Н. А., Мартынюк В. С. *Космическая погода и наша жизнь.* – Фрязино: Век 2. – 2004. – 224 с.
41. Kallenrode May-Britt. *Space Physics: An introduction to plasmas and particles in the heliosphere and magnetospheres.* – New York: Springer. – 2004. – 482 p.
42. Ермолаев Ю. И., Зеленый Л. М., Застенкер Г. Н., Петрукович А. А., Ермолаев М. Ю., Николаева Н. С., Панасюк М. И., Кузнецов С. Н., Мягкова И. Н., Муравьева Е. А., Юшков Б. Ю., Веселовский И. С., Дмитриев А. В., Жуков А. Н., Яковчук О. С., Кузнецов В. Д., Черток И. М., Ишков В. Н., Белов А. В., Ерошенко Е. А., Янке В. Г., Гайдаш С. П., Канониди Х. Д., Кузин С. В., Житник И. А., Игнатъев А. П., Слемзин В. А., Суходрев Н. К., Шестов С. А., Еселевич М. В., Еселевич В. Г., Руденко Г. В., Дворников В. М., Сдобнов В. Е., Кравцова М. В., Богод В. М., Котельников В. С., Першаков Л. А., Белоглазов М. И., Власов В. И., Чашей И. В., Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Козлов В. И., Пархомов В. А., Кугаенко Ю. А., Хисамов Р. З., Янчуковский В. Л., Кудела К. Год спустя: солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // *Геомагнетизм и аэронаомия.* – 2005. – **45**, № 6. – С. 723–763.
43. Mannucci, A. J.; Tsurutani, B. T.; Iijima, B. A.; Komjathy, A.; Saito, A.; Gonzalez, W. D.; Guarnieri, F. L.; Kozyra, J. U.; Skoug, R. Day-side global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29–30, 2003 “Halloween storms” // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – **32**, L12S02, doi:10.1029/2004GL021467.
44. Goodman J. M., *Space Weather and Telecommunications.* – Springer. – 2005.
45. Bothmer, V., Daglis, I. *Space Weather: Physics and Effects.* – Springer-Verlag New York. – 2006. ISBN 3-642-06289-X.
46. Lilensten J., Bornarel J. *Space Weather. – Environment and Societies.* – Springer. ISBN 978-1-4020-4331-4.
47. *Physics of the Space Environment* / In ed. Gombosi T. I., Houghton J. T., Dessler A. J. – Cambridge University Press. – 2006. ISBN 978-0-521-60768-1.
48. Robinson R. M. Book Review: *Space Weather, Environment and Societies – Space Weather*, 4, S05004. – 2006. – 242 p. DOI:10.1029/2006SW000243.
49. Schwenn R. *Space Weather, Living Reviews in Solar Physics* 3. – 2006. – **2**. online article.
50. *Space Weather: Research Towards Applications in Europe.* Series: *Astrophysics and Space Science Library.* Vol. 344. Red.: Lilensten, J. Springer, 2007. XII, 332 p. <https://www.springer.com/gp/book/9781402054457#reviews>
51. Tadokoro, H.; Tsuchiya, F.; Miyoshi, Y.; Misawa, H.; Morioka, A.; Evans, D. S. Electron flux enhancement in the inner radiation belt during moderate magnetic storms // *Ann. Geophys.* – 2007. – **25**, № 6. – Pp. 1359–1364.
52. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Vaidyan V. K., Alleyne H., Bailey G. J. Response of the ionosphere to super storms // *Adv. Space Res.* – 2007. – **41**. – P. 548–555. doi:/10.1016/j.asr.2007.08.029.

53. Pirog O.M., Polekh N.M., Voeykov S.V., Zherebtsov G.A., Tatarinov P.V. Ionospheric disturbances in the East-Asian region during geomagnetic storm in November, 2004 // *Advances in Space Research*. – 2007. – **39**. – P. 1335–1341.
54. Авакян С. В. Физика солнечно-земных связей: некоторые результаты, проблемы и новые подходы // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2008. – **48**, № 4. – С. 435–442.
55. Yermolaev Yu. I., Zelenyi L. M., Kuznetsov V. D., Chertok I. M., Panasyuk M. I., Myagkova I. N., Zhitnik I. A., Kuzin S. V., Eselevich V. G., Bogod V. M., Arkhangel'skaja I. V., Arkhangel'sky A. I., Kotov Yu. D. Magnetic storm of November, 2004: Solar, interplanetary, and magnetospheric disturbances // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2008. – **70**, №2 – 4. – P. 334 – 341.
56. Кременецкий І. О., Черемних О. К. Космічна погода: механізми і прояви. – За ред. О. П. Федорова. – К.: Наукова думка. – 2009. – 144 с.
57. Мирошниченко Л. И. Проблема «Солнце–Земля»: современные концепции и физические механизмы // *Космічна наука і технологія*. – 2011. – **17**, № 1. – С. 17–22.
58. Мирошниченко Л. И. Физика Солнца и солнечно-земных связей: учеб. пособие. – М.: Университетская книга. – 2011. – 174 с.
59. Авакян С. В., Воронин Н. А., Дубаренко К. А. Влияние магнитных бурь на аварийность систем электроэнергетики, автоматики и связи // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. – 2012. – **3**, № 2. – С. 253 – 265.
60. Данилов А. Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (Обзор). Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 5. С. 1–33.
61. Lakhina G. S., Alex S., Tsurutani B. T., Gonzalez W. D. Supermagnetic storms: Hazard to society. In A. S. Sharma, A. Bunde, V. P. Dimri, & D. N. Baker (Eds.), *Extreme events and natural hazards: The complexity perspective*. Washington, DC: American Geophysical Union. – 2013. – P. 267– 278.
62. Knipp D. J., Ramsay A. C., Beard E. D., Boright A. L., Cade W. B., Hewins I. M., McFadden R. H., Denig W. F., Kilcommons L. M., Shea M. A., Smart D. F. The May 1967 great storm and radio disruption event: Extreme space weather and extraordinary responses // *Space Weather*. – 2016. – **14**. – P. 614– 633.
63. National Space Weather Program: <http://www.spaceweathercenter.org/swop/NSW/P/1.html> (September 12, 2018).
64. Buonsanto M. J., Codrescu M., Emery B. A., Fesen C. G., Fuller-Rowell T. J., Melendez-Alvira D. J., Sipler D. P. Recent Results of the CEDAR Storm Study // *Adv. Space Res.* – 1997. – **20**, N. 9. – Pp. 1655–1664.
65. Balan, N., Rao P. B. Dependence of ionospheric response on the local time of sudden commencement and intensity of storms // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1990. – **52**. – P. 269–275.
66. International Solar Terrestrial physics: <https://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/>
67. Bradley P. A., Cander L. R., Kutiev I., Hanbaba R. PRIME (COST 238) Studies of Ionospheric Storm Effects // *Adv. Space Res.* – 1997. – **20**, №. 9. – Pp. 1669–1678.
68. Bilitza D. International Reference Ionosphere-Status // *Adv. Space Res.* – 1997. – **20**, №. 9. – Pp. 1751–1754.
69. Bilitza D. Preface // *Adv. Space Res.* – 1997. – **20**, N. 9. – Pp. 1649.
70. Prölss G. W., Jung M. J. Traveling atmospheric disturbances as a possible explanation for daytime positive storm effects of moderate duration at middle latitudes // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1978. – **40**. – P. 1351–1354.
71. Roble R. G., Dickinson R. E., Ridley E. C. Global circulation and temperature structures of thermosphere with high-latitude convection // *J. Geophys. Res.* – 1982. – **87**. – P. 1599–1614.
72. Mayr H. G., Volland H. Magnetic storm characteristics of the thermosphere // *J. Geophys. Res.* – 1983. – **78**. – P. 2251–2264.
73. Foster & Reech 1988 KNIТ
74. Foster J. C. Storm-time plasma transport at middle and high latitudes // *J. Geophys. Res.* – 1993. – **98**. – P. 1675–1689.
75. Blanc M., Richmond A. D. The ionospheric disturbance dynamo // *J. Geophys. Res.* – 1980. – **85**. – P. 1669–1686.
76. Домнин І. Ф., Котов Д. В., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Исследование физических процессов в геокосмосе над Украиной при помощи радара некогерентного рассеяния // *Перспективы космических исследований Украины*. – К.: Академперіодика. – 2011. – С. 62–74.

77. Потапов А. А., Черногор Л. Ф. Физические процессы в нелинейной системе Космос – Земля: каналы воздействия на биосферу (человека) // *Нелинейный мир*. – 2010. – 8, № 6. – С. 347–360.
78. Черногор Л. Ф. Геокосмосфера – открытая динамическая нелинейная система // *Вісник Харківського університету // Радіофізика та електроніка*. – 2002. – 2, № 570. – С. 175–180.
79. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. Физика геокосмических бурь: Монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины. – 2014. – 408 с.
80. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // *Космічна наука і технологія*. – 2003. – 9, № 5/6. – С. 96–105.
81. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // *Нелинейный мир*. – 2006. – 4, № 12. – С. 655–697.
82. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // *Нелинейный мир*. – 2007. – 5, № 4. – С. 225–246.
83. Черногор Л. Ф. Каналы воздействия вариаций космических и атмосферных факторов на биосферу и человека // *Фізіологічний журнал*. – 2010. – 56, № 3. – С. 25–40.
84. Черногор Л. Ф. Каналы воздействия космической и атмосферной погоды на человека // А. Л. Чижевский. Вклад в науку и культуру. I Международная научно-практическая конференция, посвященная сохранению творческого наследия и развития идей А. Л. Чижевского. Материалы. Изд-во АКФ «Политоп». – 2017. – С. 104 – 107.
85. Черногор Л. Ф. Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля как открытая неравновесная нелинейная физическая система, 1 // *Журнал проблем эволюции открытых систем*. – 2011. – 13, Т. 1. – С. 22 – 66.
86. Черногор Л. Ф. Солнце–межпланетная среда–магнитосфера–ионосфера–атмосфера–Земля как открытая неравновесная нелинейная физическая системы. 2 // *Журнал проблемы эволюции открытых систем*. – 2013. – 15, Т. 1 – С 43 – 87.
87. Черногор Л. Ф. Физика геокосмоса и космическая погода: системный подход, достижения, стратегия исследований // *Перспективы космических исследований Украины*. – К.: Академперіодика. – 2011. – С. 55–61.
88. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2003 – 8, № 1. – С. 59–106.
89. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф: монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина. – 2012. – 555 с.
90. Черногор Л. Ф. Физика и экология системы Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера // *Науки про Землю та космос – суспільству. Праці Першої наукової конференції (Київ, 25–27 червня 2007 р.)*. – К.: НАНУ-НЦАДЗ ІГН, ГАО. – 2007. – С. 86–93.
91. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System // *Radio Physics and Radio Astronomy*. – 2008. – 13, №. 2. – P. 120–137.
92. Chernogor L. F. The Earth – atmosphere – geospace system: main properties and processes // *Int. J. of Rem. Sens.* – 2011. – 32, N. 11. – P. 3199–3218.
93. Zalyubovsky I. I., Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The Earth – Atmosphere – Geospace System: Main Properties, Processes and Phenomena // *Space Research in Ukraine. 2006–2008. The Report Prepared by the Space Research Institute of NASU-NSAU*. – Kyiv. 2008. – P. 19–29.
94. Obayashi T. Morphology of Storms in the Ionosphere // *Rev. Geophys.* – 1964. – 1. – P. 335–366. – MIT Press, Cambridge, Mass.
95. Jones K. L., Rishbeth H. The origin of storm increases of mid-latitude F-layer electron concentration // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1971. – 33. – P. 391–401.
96. Lu G., Goncharenko L. P., Richmond A. D., Roble R. G., Aponte N. A dayside ionospheric positive storm phase driven by neutral winds // *J. Geophys. Res.* – 2008. – 113, A08304, doi:10.1029/2007JA012895.
97. Mendillo M., Narvaez C. Ionospheric storms at geophysically equivalent sites – Part 1: Local time patterns for sub-auroral iono-

- spheres // *Ann. Geophys.* – 2009. – **27**. – P. 1679–1694.
98. Mendillo M., Narvaez C. Ionospheric storms at geophysically equivalent sites – Part 2: Local time patterns for sub-auroral ionospheres // *Ann. Geophys.* – 2010. – **28**. – P. 1449–1462.
99. Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content // *Rev. Geophys.* – 2006. – **44**. – RG4001. doi:10.1029/2005RG000193.
100. Richards P. G., Torr D. G., Buonsanto M. J., Sipler D. P. Ionospheric Effects of the March 1990 Magnetic Storm: Comparison of Theory and Measurement // *J. Geophys. Res.* – 1994. – **99**, №. A12. – P. 23,359–23,365.
101. Burns A. G., Killeen T. L., Deng W., Carignan G. R., Roble R. G. Geomagnetic storm effects in the low- to middle-latitude upper thermosphere // *J. Geophys. Res.* – 1995. – **100**. – P. 14673–14691.
102. Lin C. H., Richmond A. D., Heelis R. A., Bailey G. J., Lu G., Liu J. Y., Yeh H. C., Su S.-Y. Theoretical study of the low and mid latitude ionospheric electron density enhancement during the October 2003 storm: Relative importance of the neutral wind and the electric field // *J. Geophys. Res.* – 2005. – **110**, A12312, doi:10.1029/2005JA011304.
103. Willis D. M., Stevens P. R., Crothers S. R. Statistics of the largest geomagnetic storms per solar cycle (1844 – 1993) // *Ann. Geophysicae.* – 1997. – **15**, N. 6. – P. 719 – 728.
104. Jacovchouk O. S., Mursula K., Hollappa L., Veselovsky I. S., Karinen A. Average properties of geomagnetic storms in 1932 – 2009 // *J. Geophys. Res.* – 2012. – **117**. – A03201. DOI: 10.1029/2011ja017093.
105. Knipp D. J., Fraser B.J., Shea M. A., Smart D. F. On the Little-Known Consequences of the 4 August 1972 Ultra-Fast Coronal Mass Ejecta: Facts, Commentary, and Call to Action // *Space Weather.* – 2018. – **16**, № 11. – P. 1635–1643.
106. Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмо-электромагнитные явления. – М.: Наука. – 1988. – 174 с.
107. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. – М.: Наука. – 2008. – 295 с.
108. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. А. Ионосферные предвестники землетрясений – М.: Наука. – 1992. – 304 с.
109. Пулинец С. А., Узунов Д. П., Карелин А. В., Давиденко Д. В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера, инициируемых ионизацией // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2015. – **55**, №4. – С. 540 – 558.
110. Pulnests S., Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earthquakes. – Berlin: Springer – Verlag. – 2004. – XIII, 315 p.
111. Prölss G. W. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere // In ed. Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Kamide Y., Arballo J. K. Magnetic storms. – Geophysical monograph series. – **98**. – American Geophysical Union, Washington, D.C. – 1998. – Pp. 249–290.
112. Герман Дж. Р., Голдберг Р. А. Солнце, погода и климат. – Л.: Гидрометеиздат. – 1981. – 319 с.
113. Моисеева Н. И., Сысуев В. М. Временная среда и биологические ритмы. – Л.: Наука. – 1981. – 126 с.
114. Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С., Поднос В. А., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 2. Процессы в искусственно возмущенной ионосфере. Вариации характеристик радиосигналов. Моделирование возмущений // *Вестник Харьковского университета. Радиофизика и электроника.* – 1999. – № 427. – С. 3–22.
115. Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 1. Экспериментальная база и процессы в естественно возмущенной ионосфере // *Вестник Харьковского университета. Радиофизика и электроника.* – 1998. – № 405. – С. 157–177.
116. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования процессов в око-

- лоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1 // ЗР. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – № 7. – С. 3–15.
117. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиопизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 2 // ЗР. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – № 8. – С. 3–19.
118. Черногор Л. Ф. Взрывы боеприпасов на военных базах – источник экологических катастроф в Украине // Экологія і ресурси. – 2004. – № 10. – С. 55–67.
119. Черногор Л. Ф. Взрывы на газопроводах и аварии на газовых хранилищах – источник экологических катастроф в Украине // Экологія і ресурси. – 2008. – № 3. – С. 56–72.
120. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Магнитноионосферные эффекты, сопровождавшие сильнейшую техногенную катастрофу // Геомагнетизм и аэрономия. – 2018. – 58, № 5. – С. 700 – 712.
121. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и геоэкологические последствия массовых химических взрывов на военных складах в г. Артемовске // Геофизический журнал. – 2004. – 26, № 4. – С. 31–44.
122. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и экологические последствия пожара и взрывов на военной базе вблизи г. Мелитополь // Геофизический журнал. – 2004. – 26, № 6. – С. 61–73.
123. Черногор Л. Ф. Геоэкологические последствия взрыва склада боеприпасов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2008. – № 4. – С. 359–369.
124. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. Монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина. – 2008. – 528 с.
125. Черногор Л. Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет. Монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина. – 2009. – 386 с.
126. Черногор Л. Ф. Тропический циклон как элемент системы Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера // Космічна наука і технологія. – 2006. – 12, № 2/3. – С. 16–26.
127. Черногор Л. Ф. Физические процессы в околоземной среде, сопровождавшие военные действия в Ираке (март – апрель 2003 г.) // Космічна наука і технологія. – 2003. – 9, № 2/3. – С.13–33.
128. Черногор Л. Ф. Экологические последствия массовых химических взрывов при техногенной катастрофе // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2006. – № 6. – С. 522–535.
129. Черногор Л. Ф. Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта «Попередження» // Космічна наука і технологія. – 1999. – 5, № 1. – С. 38–47.
130. Chernogor L. F., Blaunstein N., Radio-physical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment. – Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group. – 2013 – 542 pp.
131. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Занимонский Е. М., Лизунов Г. В., Лисаченко В. Н. Связь атмосферной и космической погодных систем // Космічна наука і технологія. – 2008. – 14, № 5. – С. 6–36.
132. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н., Лизунов Г. В., Гровс К., Молдвин М. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия. – 2004. – 9, № 2. – С. 130–151.
133. Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктиде. Под редакцией Л. Н. Литвиненко и Ю. М. Ямпольского. Национальная академия наук Украины, Харьков, 2005. – 343 с.
134. Черногор Л. Ф. Воздействие вариаций космической и атмосферной погоды на биосферу: системный подход // А. Л. Чижевский. Вклад в науку и культуру. I Международная научно-практическая конференция, посвященная сохранению творческого наследия и развития идей А. Л. Чижевского. Материалы. Изд-во АКФ «Политоп». – 2017. – С. 101 – 103.
135. Бреус Т. К., Баевский Р. М., Фунтова И. И., Никулина Г. А., Алексеев Е. В., Черникова А. Г. Влияние возмущений геомагнитного поля на реакцию адаптивного стресса у космонавтов // Космические исследования. – 2008. – Т. 46, № 4. – С. 378–383.
136. Бреус Т. К., Халберг Ф., Корнелиссен Ж. Влияние солнечной активности на физиологи-



ческие ритмы биологических систем // Биофизика. – 1995. – **40**, вып. 4. – С. 737–749.

137. Чибисов С. М. Биоритмы и гелиофизические факторы // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 9. – С. 34–41.

138. Breus T. K., Ozheredov V. A., Syutkina E. V., Rogoza A. N. Some aspects of the biological effects of Space Weather // J. Atmos. and Sol-Terr Phys. – 2008. – **70**, №. 2–4. – P. 436–441.

139. Kleimenova N. G., Kozyreva O. V., Breus T. K., Rapoport S. I. Pc-1 geomagnetic pulsations as a potential hazard of myocardial infarction // J. Atmos. and Sol-Terr Phys. – 2007. – **69**. – P. 1759–1764.

140. Заславский Г. М., Сагдеев Р. З. Введение в нелинейную физику. От маятника до турбулентности и хаоса. – М.: Наука. – 1988. – 368 с.

141. Gonzales W. D., Jozelyn J. A., Kamide Y., Kroehl H. W. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. – 1994. – **99**, № A4. – P. 5771–5792.

142. Шустер Г. Г. Детерминированный хаос: Введение. – М.: Мир. – 1988. – 240 с.

143. Физика космоса. Маленькая энциклопедия / под ред. Р. А. Сюняева. – М.: Советская энциклопедия. – 1986. – 784 с.

144. Остапенко А. А., Мальцев Ю. П. Связь потока электромагнитной энергии в высокоширотную ионосферу с параметрами солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – **45**, № 2. – С. 176–181.

145. Мусатенко С. И. Радиоизлучение околоземного космического пространства как результат воздействия солнечных вспышек

на магнитосферу и ионосферу Земли // Геомагнетизм и аэрономия. – 1980. – **20**, № 5. – С. 884–888.

146. Reeves G. D., McAdams K. L., Friedel R. H. W., O'Brien T. P. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms // Geophysical Research Letters. – 2003. – **30**, № 10. – P. 36-1 – 36-4.

147. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Tulasi Ram S., Liu J. Y. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles // J. Geophys. Res. – 2011. – **116**, A11328. DOI: 10.1029/2011JA017042.

148. Соколов С. Н. Магнитные бури и их эффекты в нижней ионосфере. Различия бурь разных типов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – **51**, № 6. – С. 757–768.

149. Yakovchouk O. S., Mursula K., Holappa L., Veselovsky I. S., Karinen A. Average properties of geomagnetic storms in 1932–2009 // J. Geophys. Res. – 2012. – **117**, №. A3. DOI: 10.1029/2011JA017093.

150. Buonsanto M. J.; González S. A.; Pi, X.; Ruohoniemi J. M.; Sulzer M. P.; Swartz W. E.; Thayer J. P.; Yuan D. N. Radar Chain Study of the May, 1995 Storm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 1999. – **61**. – P. 233–248.

151. Бархатов Н. А., Бархатова О. М. Выявление классов ионосферной возмущенности по многолетним данным о критической частоте слоя F2 // Геомагнетизм и аэрономия. – 2012. – Т. 52, №4. – С. 510–518.

Принято к печати 21.11.2021

### Приложение 1

Таблица 1. Энергетические характеристики составляющих солнечной бури у орбиты Земли

Переносчик	Энергия, Дж	Мощность, Вт	Переносчик	Энергия, Дж	Мощность, Вт
<b>Излучение<sup>1</sup></b> мягкое рентгеновское и ультрафиолетовое оптическое жесткое рентгеновское гамма радио	$(3 - 5) \cdot 10^{15}$ $(1 - 3) \cdot 10^{15}$ $(3 - 5) \cdot 10^{10}$ $(1 - 3) \cdot 10^9$ $10^8$	$(3 - 5) \cdot 10^{12}$ $(1 - 3) \cdot 10^{12}$ $(3 - 5) \cdot 10^7$ $(1 - 3) \cdot 10^6$ $10^5$	<b>Корпускулы<sup>2</sup></b> <b>(частицы высоких энергий)</b> электроны ( $\epsilon_e \geq 20$ кэВ) протоны ( $\epsilon_e \geq 20$ МэВ)	$(3 - 5) \cdot 10^{17}$ $(1 - 3) \cdot 10^{17}$	$(3 - 5) \cdot 10^{14}$ $(1 - 3) \cdot 10^{14}$
Корональные выбросы массы	$10^{24} - 10^{26}$	$10^{20} - 10^{28}$	Ударные волны	$(1 - 3) \cdot 10^{18}$	$10^{15}$

<sup>1</sup>Соответствует  $S_e$

<sup>2</sup>Соответствует  $S_m$

Таблица 2. Энергетические характеристики геокосмических бурь

Область геокосмоса	Энергия, Дж	Мощность, Вт	Продолжительность, с	Относительные изменения энергии	Примечание
Магнитосфера	$10^{16} - 10^{17}$	$10^{12} - 10^{13}$	$10^4$	$10^{-2} - 10^{-1}$	Энергия магнитного поля
	$10^8 - 10^{10}$	$10^4 - 10^6$	$10^4 - 10^5$	$10^2 - 10^4$	Энергия электрического поля
Ионосфера	$10^{12}$	$10^8$	$10^4$	$\pm 1$	Тепловая энергия
	$10^5 - 10^7$	$10 - 10^3$	$10^4 - 10^5$	$10^2 - 10^4$	Энергия электрического поля
Термосфера	$10^{15} - 10^{17}$	$10^{11} - 10^{13}$	$10^4 - 10^5$	$10^{-3} - 10^{-1}$	Тепловая энергия
Приземная атмосфера	$10^{11} - 10^{12}$	$10^6 - 10^8$	$10^4 - 10^5$	1 – 10	Энергия атмосферного электрического поля

Таблица 3. Энергетические характеристики источников, связанных с геокосмической бурей. Относительное изменение мощности нормировалось на невозмущенное значение

Источник	Энергия, Дж	Мощность, Вт	Продолжительность, с	Относительное изменение мощности	Примечание
Солнечный ветер (возмущенный)	$10^{18} - 10^{20}$	$10^{14} - 10^{15}$	$10^4 - 10^5$	$10^2 - 10^3$	Скорость 500–1500 км/с, концентрация плазмы $10^7 - 10^8 \text{ м}^{-3}$
Высыпающиеся высокоэнергичные частицы	$10^{12} - 10^{14}$	$10^9 - 10^{10}$	$10^3 - 10^4$	$10 - 10^2$	Высокие широты, потоки энергии $10^4 - 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
	$10^{10} - 10^{12}$	$10^7 - 10^8$	$10^3 - 10^4$	$10 - 10^2$	Средние широты, потоки энергии $10^6 - 10^5 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
Джоулева диссипация	$10^{13} - 10^{15}$	$10^{11} - 10^{12}$	$10^2 - 10^3$	1–10	Высокие широты, электрическое поле 0.1 В/м, плотность тока $10^{-5} - 10^{-4} \text{ А}/\text{м}^2$
Термосферный ветер	$10^{13} - 10^{15}$	$10^9 - 10^{10}$	$10^4 - 10^5$	1–10	Скорость ветра 50–100 м/с

Таблица 4. Статистика ИБ для станции Boulder, сопровождавших МБ с  $D_{st \min} < -50$  нТл (LT – местное время) [147]

Тип бури	05–12 LT	13–20 LT	21–04 LT	Общее количество
<i>P</i>	62	28	33	123
<i>PN</i>	28	19	5	52
<i>N</i>	48	96	80	224
<i>NP</i>	3	5	9	17
<i>NS</i>	24	23	22	69
Общее количество	165	170	150	485

Таблица 5. Статистика ИБ для станции Kokubunji, сопровождавших МБ с  $D_{st \min} < -50$  нТл (LT – местное время) [147]

Тип бури	05–12 LT	13–20 LT	21–04 LT	Общее количество
<i>P</i>	100	57	98	255
<i>PN</i>	28	26	8	62
<i>N</i>	33	34	36	103
<i>NP</i>	5	1	6	12
<i>NS</i>	35	26	31	92
Общее количество	203	143	178	524

Таблица 6. Классификация ОИБ и их основные параметры

Тип ИБ	Название ОИБ (возмущения)	$\frac{N_{m0}}{N_{m\min}}$	$I_{st}$ , дБ	$\frac{T_e}{T_{e0}}$	$\frac{T_i}{T_{i0}}$	Продолжительность ИБ, часы	Количество ИБ в цикле СА
NIS5	Крайне сильная (Extreme)	> 10	> 10	3–4	2–2.5	70–100	2–4
NIS4	Очень сильная (Severe)	4–10	6–10	2–3	1.5–2	50–70	50–150
NIS3	Сильная (Strong)	2–4	3–6	1.5–2	1.3–1.5	30–50	150–300
NIS2	Умеренная (Moderate)	1.4–2	1.5–3.0	1.2–1.5	1.1–1.3	20–30	400–800
NIS1	Слабое возмущение (Minor)	1–1.4	0–1.5	1–1.2	1–1.1	5–20	1000–2000

Таблица 7. Характеристики ПИБ в F- и E-областях ионосферы

Тип ПИБ	Название ПИБ	Эффекты ПИБ	Индекс ПИБ, дБ	Количество ПИБ в цикле СА
PIS 5	Крайне сильная (Extreme)	Увеличение до 2–3 раз ПЭС, увеличение частотной емкости декаметрового канала радиосвязи, увеличение в 1.5–2 раза коэффициента поглощения гектометровых, декаметровых, метровых радиоволн	> 4.8	1–3
PIS 4	Очень сильная (Severe)	То же	4.0	~100
PIS 3	Сильная (Strong)	То же	3.2	~200
PIS 2	Умеренная (Moderate)	То же	2.3	~600
PIS 1	Слабая (Minor)	Увеличение на десятки процентов ПЭС, частотной емкости декаметрового канала радиосвязи, коэффициента поглощения гектометровых и метровых радиоволн	1.0	1000–2000

Таблица 8. Характеристики ПИБ в D-области ионосферы

Тип ПИБ	Название ПИБ	Эффекты ПИБ	Индекс ПИБ, дБ	Количество ПИБ в цикле СА
PIS 5	Крайне сильная (Extreme)	Наступает явление типа «блэкаут», разрушение ионосферных радиолоний, полное поглощение радиоволн километрового, гектометрового, декаметрового и отчасти метрового диапазонов, фазовые аномалии мириаметровых и более длинных радио-волн	> 25	1–3
PIS 4	Очень сильная (Severe)	То же	20	~100
PIS 3	Сильная (Strong)	Нарушения в функционировании ионосферных радиолоний, увеличение поглощения радиоволн километрового, гектометрового, декаметрового и метрового диапазонов, фазовые искажения мириаметровых и более длинных радиоволн	15	~200
PIS 2	Умеренная (Moderate)	То же	10	~600
PIS 1	Слабая (Minor)	Незначительные нарушения в функционировании ионосферных радиолоний, увеличение поглощения радиоволн километрового, гектометрового, декаметрового и метрового диапазонов, фазовые искажения мириаметровых и более длинных радио-волн	5	~1000
PIS 0	Крайне слабая (Extreme minor)	Слабое воздействие на функционирование радиолоний, незначительное увеличение поглощения радиоволн километрового, гектометрового, декаметрового и метрового диапазонов, незначительные фазовые искажения мириаметровых и более длинных радиоволн	1	2000–3000

Таблица 9. Зависимость числа МБ за цикл СА от минимального значения  $D_{st}$ -индекса

$ D_{st} $ , нТл	50–100	100–150	150–200	200–300	360–680	680–1300*	>1300*
$n_{ms}$	181	52	19	8.4	1	0.1	0.01

\*Символ обозначает результат экстраполяции согласно регрессионной зависимости (10)

Таблица 10. Примерные характеристики магнитных возмущений и классификация магнитных бурь

$K_p$ индекс	$ D_{st}^* $ , нТл	$\Delta t$ , ч	$E_{ms}$ , Дж	$P_m$ , Вт	Качественная характеристика возмущения/бури
0	< 3	1	$< 1.2 \times 10^{14}$	$< 3.3 \times 10^{10}$	Крайне слабое возмущение
1	3–5	1–2	$(1.2–2) \times 10^{14}$	$(1.7–5.6) \times 10^{10}$	Сверхслабое возмущение
2	5–10	2–3	$(2–4) \times 10^{14}$	$(1.9–5.6) \times 10^{10}$	Очень слабое возмущение
3	10–20	3–5	$(4–8) \times 10^{14}$	$(2.2–7.4) \times 10^{10}$	Слабая буря
$K_p$ индекс	$ D_{st}^* $ , нТл	$\Delta t$ , ч	$E_{ms}$ , Дж	$P_m$ , Вт	Качественная характеристика возмущения/бури
4	20–40	4–6	$(0.8–16) \times 10^{15}$	$(3.7–11.1) \times 10^{10}$	Весьма умеренная буря
5	40–70	5–7	$(1.3–2.8) \times 10^{15}$	$(6.3–15.6) \times 10^{10}$	Умеренная буря
6	70–120	6–8	$(2.8–4.8) \times 10^{15}$	$(9.7–22.2) \times 10^{10}$	Сильная буря
7	120–200	7–9	$(4.8–8) \times 10^{15}$	$(1.5–3.2) \times 10^{11}$	Очень сильная буря
8	200–300	8–10	$(0.8–1.2) \times 10^{16}$	$(2.2–4.2) \times 10^{11}$	Сверхсильная буря
9	300–500	10–12	$(1.2–2) \times 10^{16}$	$(2.8–5.6) \times 10^{11}$	Крайне сильная буря
10	500–1000	10–12	$(2–4) \times 10^{16}$	$(4.6–11) \times 10^{11}$	Исключительно сильная буря
11	1000–2000	10–12	$(4–8) \times 10^{16}$	$(9.3–22) \times 10^{11}$	Экстремальная буря

Здесь  $D_{st}^*$  – скорректированное значение  $D_{st}$ -индекса,  $\Delta t$  – средняя продолжительность главной фазы МБ,  $E_{ms}$  – возмущение энергии геомагнитного поля,  $P_m$  – средняя мощность МБ. МБ соответствуют  $K_p \geq 3$ . Значения  $K_p = 10–11$  ожидаются один раз в несколько сотен-тысяч лет.

Таблица 11. Классификация NOAA магнитных бурь по  $K_p$ -индексу

Тип МБ	Название МБ	Эффекты МБ (краткое описание воздействия МБ на системы жизнеобеспечения людей)	Индекс $K_p$	Количество МБ в цикле СА (их продолжительность)
G5	Крайне сильная (Extreme)	Выход из строя линий электропередач, нарушения траектории КА, сбои в работе систем радиосвязи, спутниковой навигации, смещение экваториальной границы полярного сияния до геомагнитной широты $\Phi = 40^\circ$	$K_p = 9$	4 (4 дня)
G4	Очень сильная (Severe)	Выход из строя систем контроля и защиты энергетических сетей, нарушение траектории и ориентации КА, сбои в работе систем радиосвязи, спутниковой навигации, смещение экваториальной границы полярного сияния до $\Phi = 45^\circ$	$K_p = 8$ , включая 9–	100 (60 дней)
G3	Сильная (Strong)	Нарушения в работе устройств защиты и сигнализации энергетических систем, дополнительное торможение низкоорбитальных КА, сбои в работе систем радиосвязи и навигации, вероятность наблюдения полярного сияния до $\Phi = 50^\circ$	$K_p = 7$	200 (130 дней)
G2	Умеренная	Сбои в работе высокоширотных энергетических систем, необходимость коррекции орбиты КА из-за дополнительного торможения,	$K_p = 6$	600 (360 дней)

	(Moderate)	замирания ВЧ радиосигналов в высоких широтах, вероятность наблюдения полярного сияния до $\Phi = 55^\circ$		
G1	Слабая (Minor)	Небольшие нарушения в работе электрических сетей, слабые воздействия на системы КА, воздействие МБ этого уровня и более высоких уровней на поведение мигрирующих животных, вероятность наблюдения полярного сияния в высоких широтах	$K_p = 5$	1700 (900 дней)

Примечание: здесь КА – космический аппарат, ВЧ – высокочастотный

Таблица 12. Дополненная автором классификация по  $K_p$ -индексу

Тип МБ	Название МБ	Вероятные эффекты МБ	Индекс $K_p$	Вероятный интервал между МБ (их продолжительность)
G7	Экстремальная	Выход из строя почти всех линий электро-передач, аварии на КА, нарушения их траектории, почти полное прекращение радиосвязи и спутниковой радионавигации, смещение границы полярных сияний практически до геомагнитного экватора	$K_p = 11$	~1000 лет (несколько суток)
G6	Исключительно сильная	Выход из строя многих линий электропередач, сбои в функционировании и нарушение траекторий КА, сбои в работе большинства систем радиосвязи и спутниковой радионавигации, смещение границы полярных сияний до геомагнитной широты $\Phi = 25-35^\circ$	$K_p = 10$	100–200 лет (1–2 суток)

Таблица 13. Классификация ГБ и их основные параметры

Тип ГБ	Названия ГБ	$\varepsilon_{\text{Аmax}}$ , ГВт	$G_{st}$ , дБ	Продолжительность, часы	Количество ГБ в цикле СА
GSSI5	Крайне сильная (Extreme)	1200	18	20–25	2–4
GSSI4	Очень сильная (Severe)	600	15	15–20	50–150
Тип ГБ	Названия ГБ	$\varepsilon_{\text{Аmax}}$ , ГВт	$G_{st}$ , дБ	Продолжительность, часы	Количество ГБ в цикле СА
GSSI3	Сильная (Strong)	300	12	9–15	150–300
GSSI2	Умеренная (Moderate)	100	7	6–9	400–800
GSSI1	Слабая (Minor)	20	0	3–6	1000–2000