

**I. СОЛНЦЕ – МЕЖПЛАНЕТНАЯ СРЕДА – МАГНИТОСФЕРА – ИОНОСФЕРА – АТМОСФЕРА – ЗЕМЛЯ КАК ОТКРЫТАЯ НЕРАВНОВЕСНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.**

**Черногор Л. Ф.**

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Украина, г. Харьков*

*Обосновано представление о том, что образование Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера (ЗАИМ) является сложной открытой динамической нелинейной системой. Сформулированы основные положения парадигмы, которые иллюстрируются многими поучительными примерами. Показано, что к важнейшим свойствам системы относятся появления триггерных механизмов высвобождения энергии.*

*Продемонстрировано, что высокоэнергичные явления в системе вызывают в ней целый комплекс процессов, перестройку характера взаимодействия подсистем.*

*Установлено, что высыпание энергичных частиц из магнитосферы в средних широтах сопровождается большинством нестационарных процессов в системе ЗАИМ.*

**Введение**

Одной из главнейших особенностей современной науки является ее дифференциация. Естествознание и его базис – физика – разделились на множество на первый взгляд мало связанных направлений. Не является исключением и физика Земли, атмосферы и околоземного космоса (геокосмоса). Каждая наука имеет свой традиционный объект исследования. Так, например, геология изучает состав, строение и эволюцию Земли, метеорология и климатология – атмосферу, гидросферу и сушу, аэрономия – верхнюю атмосферу (включая ионосферу), геомагнетизм – магнитосферу, астрономия – Солнце, Луну, планеты и т. д.

Расчленение единого природного объекта на составные части было необходимым и оправданным. Анализ этих частей позволил выявить многие важные черты системы, а точнее ее составляющих. Такой подход допустим на первой, низшей, стадии исследования. На высших стадиях этого недостаточно по ряду причин. Во-первых, деление изучаемой системы на подсистемы является условным и искусственным. Во-вторых, подсистемы не являются изолированными друг от друга, между ними существуют многочисленные прямые и обратные связи. Изменение какого-

либо параметра подсистемы, превышающее порог чувствительности, непременно сказывается на состоянии других подсистем и системы в целом, вызывая ее перестройку (свойство целостности системы). В-третьих, система обладает совокупностью качеств, которые отсутствуют в подсистемах (свойство эмерджентности).

Важнейшим достижением физики Солнца, Земли, атмосферы и геокосмоса конца XX-го века стало осознание того факта, что качественно новое понимание наблюдаемых процессов во внутренних и внешних оболочках нашей планеты, а значит и построение более точных и адекватных их физико-математических моделей, было невозможным в рамках существовавших представлений, в рамках прежней парадигмы, когда упомянутые оболочки рассматривались, как правило, изолированными друг от друга. Если же взаимодействие между двумя оболочками и учитывалось, обычно оно считалось линейным. Оказалось, что ни одна оболочка не является самодостаточной, так как ее мгновенное состояние не определяет ее эволюцию в будущем.

Новая, а именно, системная парадигма зарождалась постепенно и явилась результатом труда большого числа специалистов в

своей области (геологов, геофизиков, сейсмологов, метеорологов, радиофизиков, специалистов по аэронауке, геомагнетизму, физике Солнца и солнечно-земным связям и т. д.). Ее истоки обнаруживаются в трудах В. И. Вернадского, А. Л. Чижевского и других сторонников интеграции естественных наук. В. И. Вернадский, работая в докосмическую эру, конечно, не рассматривал процессы в верхней атмосфере, ионосфере и магнитосфере (в геокосмосе). А. Л. Чижевский является основоположником гелиобиологии – науки о влиянии явлений на Солнце на земные процессы. Отдельные высказывания в пользу системного подхода можно найти в более новых работах [1 – 8]. Системный подход получил развитие в работах автора [9 – 22].

В отличие от подсистемы, система обладает большей степенью самодостаточности и результат ее эволюции может быть предсказан более определенным образом на основе ее мгновенного состояния. Термин “предсказан” понятен для детерминированных систем. Для систем с возможными хаотическими режимами его следует понимать в широком смысле. В этом случае удается предсказать моменты времени перехода к хаотическому режиму, интервалы параметров его существования, типы хаотических структур и т. п.

Целью работы является описание основных положений системной парадигмы применительно к объекту Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля (СМСМИАЗ), изложение результатов экспериментальных и теоретических исследований, обсуждение важнейших процессов в этом объекте и обоснование представлений о его главных свойствах.

В настоящее время теория системы СМСМИАЗ далека от завершения. Ввиду этого для иллюстрации свойств системы приводятся многие поучительные примеры. С другой стороны, излагаются общие принципы (положения системной парадигмы), способ-

ные объяснить многие наблюдаемые процессы в обсуждаемой системе.

## **1. Основные положения системной парадигмы**

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). Далее рассматриваются системы ЗАИМ и СМСМИАЗ.

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”). В свою очередь 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 (СМСМИАЗ), а также включить биосферу (Б) и человека в качестве подсистемы в систему СМСМИАЗБ.

2. Между составными частями систем ЗАИМ и СМСМИАЗ имеют место разнооб-

разные 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, самоорганизация, 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 рис. 1, рис. 2 [8, 10].

## 2. Общие сведения о системе

### 2.1. Строение системы

Земля – третья планета Солнечной системы.

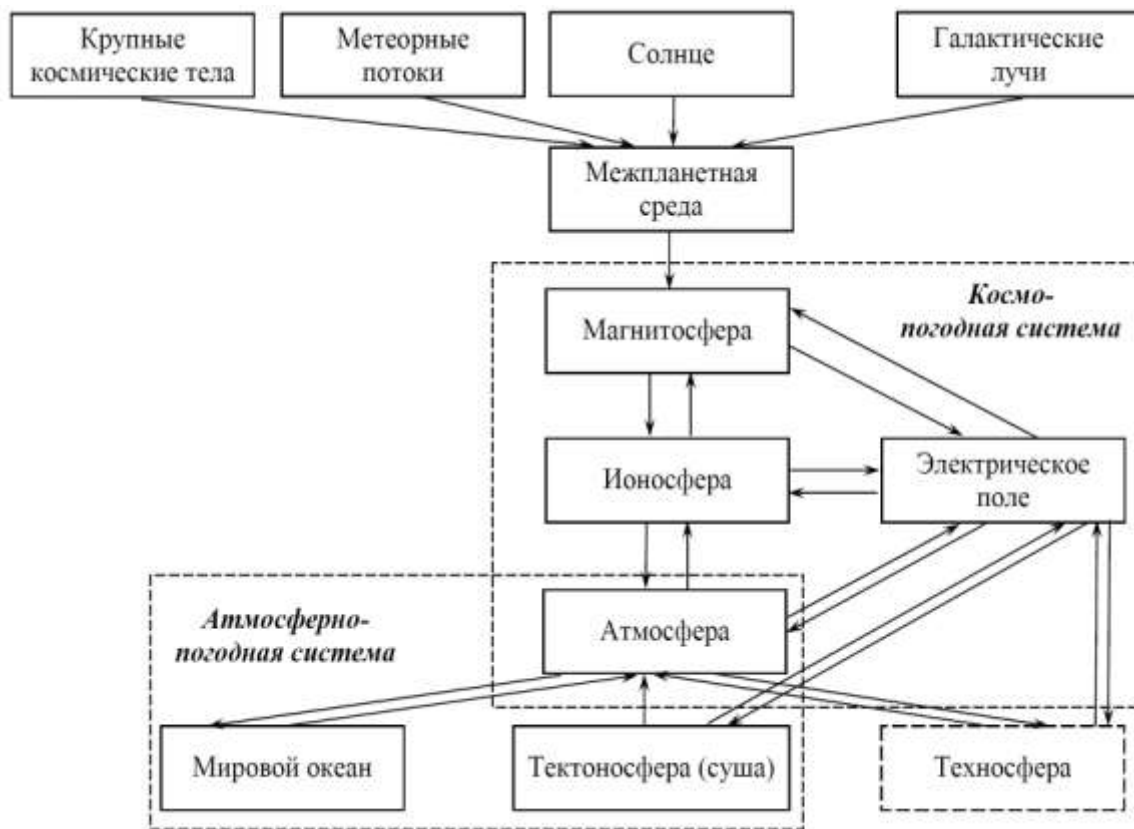


Рис. 1. Строение системы СМСМИАЗ



Рис. 2. Схема взаимодействия подсистем в системе СМСМИАЗ (АГВ – акустико-гравитационные волны)

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 тектоносферой. 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. Сложную структуру имеет и магнитосфера.

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  $R \approx 10R_E$  ( $R_E$  – радиус Земли) геокосмос постепенно переходит в межпланетную среду. 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 систему ЗАИМ. Последняя отражает единство процессов внутри планеты на поверхности Земли и в окружающем ее пространстве. Система ЗАИМ входит в систему СМСМИАЗ.

## 2.2. Процессы в системе

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 [23].

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 (рис. 1, 2), которые изучены в настоящее время недостаточно [24, 25]. Из рис. 1 и 2 видно, что 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 целый комплекс первичных и вторичных процессов на Земле. К первичным процессам относится рост электронной концентрации в ионосфере, дополнительный нагрев геокосмосферы, изменение прозрачности атмосферы на высотах, где эффективно поглощаются солнечные 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 радиосигналов, эффект Форбуша, генерацию акустико-гравитационных волн (АГВ) и т. п.

К еще более серьезным последствиям приводят выбросы корональной массы, вызывающие усиление интенсивности и скорости 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  $1 \div 2$  % изменяется индукция геомагнитного поля (наступает магнитная буря), нагревается ионосфера, в ней в  $2 \div 10$  раз уменьшается либо существенно увеличивается концентрация заряжен-

ных 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 и т. п. 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 синергетического процесса – геокосмической бури. В литературе обычно геокосмическая буря называется 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 широтах, но затрагивают также и низкие широты (см. рис. 2). По высоте эффекты охватывают всю систему ЗАИМ.

Выше перечислены процессы, ответственные за перенос вещества и излучений “сверху”. Именно они в основном формируют состояние космической погоды. Состояние обычной погоды, как известно, определяется преимущественно процессами в системе ОСА (океан – суша – атмосфера) [26]. В определенной степени на погоду влияют процессы на Солнце, однако, этот вопрос в настоящее время мало изучен [27]. К нему мы еще вернемся в подразделе 5.2.

Нельзя полностью игнорировать потоки излучений и вещества “снизу” и, в частности, их влияние на космическую погоду и процессы в геокосмосфере. Такие потоки возникают при землетрясениях, извержениях вулканов, грозах, энергичных атмосферных процессах и т. д.

В последние десятилетия стало ясно, что на состояние системы ЗАИМ и космической погоды 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 [28 – 33]. Поэтому мощные антропогенные воздействия на подсистемы ЗАИМ также должны приниматься во внимание. Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и в геокосмосе подробно обсуждается в работе [34].

### **2.3. Взаимодействие подсистем**

Физико-химические процессы в каждой из подсистем изучены неплохо. Этого нельзя сказать о механизмах взаимодействия подсистем и о процессах в системе в целом. Ясно, что взаимодействие между подсистемами осуществляется при помощи квазистатических полей (гравитационного, магнитного и электрического), переменных электромагнитных полей, АГВ, потоков излучения, заряженных частиц, плазмы, вещества и т. п. Воздействие на данную подсистему других подсистем может быть совместным (синергетическим). Исследование результатов совместного действия является предметом междисциплинарной системы знаний – синергетики [35, 36].

В настоящее время моделирование физико-химических процессов в подсистемах идет по пути учета возможно большего количества элементарных процессов. Например, для изучения кинетики заряженных частиц на

высотах  $z \leq 100$  км используется свыше 100 связанных дифференциальных уравнений. Такое моделирование относится к детальному. При системном подходе оно не является простым и удобным.

Для описания системы ЗАИМ как единого образования полезно отказаться от детального моделирования и ограничиться описанием главных процессов в системе “крупными мазками”. Для этого необходимо ввести небольшое количество (например, не более 10) ведущих или основных переменных и получить исходные уравнения, основываясь на фундаментальных законах – законе сохранения энергии, массы и т. п.

Примером таких уравнений могут быть соотношения, описывающие корпускулярно-волновой канал взаимодействия магнитосферы с ионосферой и атмосферой. В этом случае заряженные частицы (электроны и ионы) в магнитосферу поступают из солнечного ветра и высыпаются в ионосферу и атмосферу в результате генерации циклотронной неустойчивости [37]. Последнее становится возможным как за счет притока энергии очень низкочастотного (ОНЧ) излучения из нижних слоев атмосферы (в результате мировой грозовой деятельности), так и за счет перекачки энергии от частиц к ОНЧ-волнам с частотой  $f \approx 0,1 - 10$  кГц и альвеновским волнам (об этом см. подробнее в подразделе 5. 1).

Существенную роль во взаимодействии подсистем играет их неравновесность.

## **3. СМСМИАЗ и ЗАИМ – открытые неравновесные нелинейные системы**

### **3.1. Общие сведения**

СМСМИАЗ и ЗАИМ относятся к открытым системам. В них поступает энергия, вещество, излучение и отрицательная энтропия как “сверху”, так и “снизу”. Энергетические характеристики потоков “сверху” и “снизу” приведены соответственно в табл. 1 и 2. Видно, что эти характеристики в ряде случаев сопоставимы.

Потоки энергии, вещества и т. д. изменяются во времени. Их величина зависит от

Таблица 1. Энергетические характеристики потоков “сверху”

Переносчик	$P_p$ , Вт/м <sup>2</sup>	Площадь, м <sup>2</sup>	$P$ , Вт	Длительность, с	Примечание
Излучение спокойного Солнца: оптическое ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское жесткое рентгеновское	1400 $\sim 2 \cdot 10^2$ $\sim 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{14}$ $1,3 \cdot 10^{14}$ $1,3 \cdot 10^{14}$	$1,8 \cdot 10^{17}$ $\sim 3 \cdot 10^{16}$ $\sim 10^6$	Непрерывно	Длина волны $\lambda \approx 0,4 - 0,8$ мкм $\lambda \approx 1$ нм – 0,4 мкм $\lambda \approx 0,5 - 1$ нм
Излучение возмущенного Солнца: оптическое ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское жесткое рентгеновское	1400 $\sim 2 \cdot 10^2$ $\sim 5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{14}$ $1,3 \cdot 10^{14}$ $1,3 \cdot 10^{14}$	$1,8 \cdot 10^{17}$ $\sim 3 \cdot 10^{16}$ $\sim 6,5 \cdot 10^{10}$	$\sim 10^2$ $\sim 10^2$ $\sim 10^2$	$\lambda \approx 0,4 - 0,8$ мкм $\lambda \approx 1$ нм – 0,4 мкм $\lambda \approx 0,5 - 1$ нм
Солнечные протоны: спокойные условия возмущенные условия	0,1 2–3	$10^{16}$ $10^{16}$	$10^{15}$ $(2 - 3) \cdot 10^{16}$	Непрерывно $10^2 - 10^5$	Энергия протонов 10–100 МэВ Плотность потока $10^{11} - 10^9$ м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> Плотность потока $(2-3) \cdot 10^{12}$ м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>
Солнечный ветер: спокойный возмущенный	$6 \cdot 10^{-5}$ $5 \cdot 10^{-2}$	$10^{16}$ $10^{16}$	$6 \cdot 10^{11}$ $5 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$	$N_p \approx 5 \cdot 10^6$ м <sup>-3</sup> , $v_p \approx 400$ км/с $N_p \approx 10^8$ м <sup>-3</sup> , $v_p \approx 1000$ км/с
Галактические космические лучи	$10^{-6}$	$\sim 10^{14}$	$10^8$	Непрерывно	Плотность потока $10^4$ м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> , энергия протонов $\epsilon_p = 1$ ГэВ
Метеорные потоки: фон сильнейший дождь	$5 \cdot 10^{-7}$ $5 \cdot 10^{-2}$	$\sim 10^{14}$ $\sim 10^{14}$	$\sim 5 \cdot 10^7$ $\sim 5 \cdot 10^{12}$	Непрерывно $10^3 - 10^4$	Массы частиц $m \geq 10^{-10}$ кг То же
Высыпающиеся высокоэнергичные частицы: спокойные условия возмущенные условия	$10^{-4}$ 1	$\sim 10^{13}$ $\sim 10^{13}$	$10^9$ $\sim 10^{13}$	$10^2 - 10^4$ $10^2 - 10^4$	Высокие широты То же
Инфракрасное излучение термосферы: спокойные условия возмущенные условия	$10^{-3} - 10^{-2}$ 0,1–1	$5 \cdot 10^{14}$ $5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{11} - 5 \cdot 10^{12}$ $5 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{15}$	Непрерывно $10^2 - 10^4$	$\lambda = 2 - 10$ мкм Сильнее в высоких широтах

нестационарных процессов на Солнце и внутри Земли. Поэтому системы СМСМИАЗ и ЗАИМ являются также динамическими. Такие системы удобно описывать уравнениями баланса, которые представляют собой законы сохранения энергии, количества теплоты, массы, заряда и т. п. Типичные уравнения баланса для физической величины  $\rho$  имеют вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \mathbf{j} = q_{\text{пр}} - q_1, \quad (1)$$

где  $\mathbf{j} = \rho \mathbf{v}$  – плотность потока,  $\mathbf{v}$  – скорость переноса,  $q_{\text{пр}}$  – скорость производства,  $q_1$  – скорость потерь.

В системах СМСМИАЗ и ЗАИМ имеют место, как правило, необратимые диссипативные процессы. К ним относятся вязкость, теплопроводность, диффузия, термодиффузия, химические реакции, фазовые переходы и т. д.

В динамических системах могут протекать как обратимые, так и необратимые процессы. Единственной функцией состояния, которая позволяет различить эти процессы, является энтропия.

Уравнение баланса удельной (отнесенной к единице массы) энтропии также можно представить в виде соотношения (1).

Таблица 2. Энергетические характеристики потоков “снизу”

Переносчик	$P_p$ , Вт/м <sup>2</sup>	Площадь, м <sup>2</sup>	$P$ , Вт	Длительность, с	Примечание
Инфракрасное излучение поверхности Земли	$4 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{17}$	Непрерывно	Поглощается и излучается атмосферой
Водяной пар	80	$5 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{16}$	То же	При конденсации выделяется тепло в атмосфере
Конвекция воздуха	30	$5 \cdot 10^{14}$	$1,5 \cdot 10^{16}$	То же	
Поток тепла из недр Земли	$6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{13}$	То же	Играет незначительную роль
Атмосферная турбулентность	1–10	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{14}$ – $5 \cdot 10^{15}$	То же	До высот ~100–120 км
Внутренние гравитационные волны (ВГВ)	0,1–1	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{13}$ – $5 \cdot 10^{14}$	То же	Эффективно диссипируют в термосфере
Приливные волны	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{11}$	То же	То же
Планетарные волны	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{11}$	То же	То же
Инфразвук	$10^{-4}$ – $10^{-3}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{10}$ – $5 \cdot 10^{11}$	То же	Достигает F-области ионосферы
Инфразвук от сильнейшего землетрясения	$10^2$ – $10^3$	$10^{11}$	$10^{13}$ – $10^{14}$	$10^2$	То же
Электромагнитное излучение сильнейшего землетрясения	$10^{-3}$ – $10^{-2}$	$10^{11}$	$10^8$ – $10^9$	$10^2$ – $10^3$	Достигает ионосферы и магнитосферы
Акустическое излучение сильнейшей молнии	$10^{-3}$	$10^9$	$10^6$	~1	Диссипирует в атмосфере
Электромагнитное излучение сильнейшей молнии	$10^{-3}$	$10^9$	$10^6$	~1	Достигает ионосферы и магнитосферы
Акустическое излучение мировой грозовой активности	$10^{-3}$	$10^{12}$	$10^9$	Непрерывно	Диссипирует в атмосфере
Электромагнитное излучение мировой грозовой активности	$10^{-3}$	$10^{12}$	$10^9$	То же	Достигает ионосферы и магнитосферы

Для описания процессов в системах СМСМИАЗ и ЗАИМ удобно использовать понятие отрицательной энтропии, называемой негэнтропией (см., например, [38]). Именно она расходуется в системе с диссипативными процессами и поддерживает систему в неравновесном состоянии.

Добавим, что все физико-химические процессы в геокосмосфере идут за счет расхода негэнтропии. Ее приток возникает из-за того, что солнечному излучению соответствует, как известно, температура  $T \approx 6000$  К, а

уходящему из геокосмосферы инфракрасному излучению – температура  $T \approx 300$  К.

Системы СМСМИАЗ и ЗАИМ относятся к нелинейным системам. Уравнения, описывающие процессы в геокосмосфере, вообще говоря, являются нелинейными. Дело в том, что обмен энергией, веществом или энтропией столь велик, что система может уйти далеко от состояния равновесия. Обобщенные потоки нелинейным образом зависят от обобщенных сил. Это означает, что в системе уравнений, состоящей из уравнений баланса



вида (1), для каждой физической величины  $\rho_i$  имеем нелинейные зависимости

$$\begin{aligned} j_i &= f(t, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n), \quad 1 \leq i \leq n, \\ q_{\text{пр}i} &= \varphi(t, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n), \\ q_{\text{л}i} &= F(t, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n). \end{aligned}$$

### 3.2. Свойства систем

Свойства открытых динамических нелинейных систем в корне отличаются от поведения линейных систем (см., например, [39]). Перечислим кратко эти свойства.

1. *Сложность процессов, множественность их состояний.* При переходе из одного состояния в другое система испытывает бифуркацию. Важно, что “других” состояний, как предсказывает теория катастроф [40, 41], 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 [42]. 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 бабочка-эффекта (эффекта бабочки). Впервые он был обнаружен при помощи компьютерного моделирования метеопроцессов в атмосфере Э. Лоренцом (см., например, [39]).

Приведем примеры хаотизации в атмосфере и геокосмосфере. Самым ярким и, без-

условно, классическим из них является процесс атмосферной турбулентности. В этом случае энергия первичного, вполне детерминированного, вихря превращается в энергию вторичных вихрей с меньшим характерным масштабом, а затем в энергию все более мелких вихрей. Важно, что в основе описания движения газа лежит нелинейное уравнение Навье–Стокса, не содержащее случайной силы:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla \mathbf{v} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{v} + \left( \frac{\zeta}{\rho} + \frac{\nu}{3} \right) \nabla \nabla \mathbf{v},$$

где  $\mathbf{v}$  – скорость физически малого объема жидкости или газа,  $\mathbf{F}$  – напряженность поля массовых сил,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\zeta$  – вторая вязкость,  $\rho$  и  $p$  – плотность и давление газа.

Пример с турбулентностью поучителен еще и потому, что турбулентное движение, являясь более сложным, чем ламинарное, относится к более упорядоченным по сравнению с последним [43].

Другим примером детерминированного хаоса является генерация случайно-неоднородной структуры в околоземной плазме в широком диапазоне размеров – примерно от  $10^{-2}$  до  $10^5$  м. Вынуждающие силы в этом случае, как правило, являются вполне детерминированными.

3. В определенном смысле, противоположностью детерминированного хаоса является *самоорганизация*, т. е. возникновение порядка из беспорядка. Процессы самоорганизации изучает уже упомянутая синергетика [35, 36]. Она представляет собой теорию самоорганизации нелинейных открытых диссипативных систем.

Строго говоря, не бывает ни абсолютного хаоса, ни абсолютного порядка. Самоорганизация и деградация – две реализации одного и того же процесса. Системы ЗАИМ и СМСМИАЗ находятся в некотором промежуточном состоянии, им свойственны как процессы деградации, так и процессы самоорганизации. Последняя обеспечивается, как пра-

вило, диссипацией энергии, вещества и энтропии.

Классическим примером самоорганизации является образование упорядоченной облачной структуры. Подобные структуры в лабораторных условиях называют ячейками Бенара [39].

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. Для полного 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.

Рассмотрим два важнейшие свойства систем СМСМИАЗ и ЗАИМ подробнее.

#### 4. Самоорганизация в системе и ее подсистемах

Самоорганизация предполагает образование упорядоченных или когерентных структур. Такие структуры должны существовать как внутри Земли, так и во всех ее внешних оболочках. Как уже отмечалось, их изучение является предметом синергетики. Общей теории таких систем посвящены фундаментальные работы (см., например, [35, 36, 44 – 49]).

##### 4.1. Примеры

Классическим примером самоорганизации являются уже упомянутые ячейки Бенара, сопровождающие конвекцию. Процессы такого типа, происходящие в атмосфере, хорошо изучены. Следует ожидать их и в мантии

Земли. Естественно, что эти ячейки существенно (на очень много порядков) отличаются по своим пространственно-временным характеристикам.

Пример упорядоченной облачной структуры над украинской антарктической станцией "Академик Вернадский" приведен в [11 – 13]. Станция расположена вблизи Атлантического побережья. Процесс самоорганизации, по-видимому, обусловлен нелинейными взаимодействиями в системе ОСА.

К классическим примерам также относится шаровая молния.

В последние годы во всех внешних геосферах изучаются упорядоченные структуры – диссипативные солитоны и ударные волны (см., например, [50 – 54]). Подобные структуры обнаружены в вариациях геомагнитного поля, параметров атмосферы и ионосферы. Как правило, они возникают при значительных энерговыделениях в системах СМСМИАЗ и ЗАИМ. К ним относятся землетрясения, извержения вулканов, грозы, взрывы, старты и полеты крупных ракет и т. д.

Другими примерами самоорганизации в атмосфере являются зарождения ураганов, смерчей, струйных течений, волн Россби – Блиновой, циклонов и т. п. Разумеется, упорядоченные структуры существуют и в океане – течения, ринги (аналоги циклонов и антициклонов), явления Эль-Ниньо и Ла-Ниньо, а также многие другие.

Пространственно-временная самоорганизация возникает за счет незначительных флуктуаций параметров системы. Математической моделью подобных процессов является система нелинейных дифференциальных уравнений со случайными вынуждающими силами:

$$\dot{x}_i = \Phi_{NLi}(x_1, x_2, \dots, x_n) + \xi_i(t), \quad (2)$$

где  $\Phi_{NLi}$  – нелинейная функция,  $\xi_i$  – случайная функция,  $i = 1 \dots n$ . Частным случаем этой системы является хорошо изученная модель, называемая "брюсселятором" [55]:

$$\dot{x}_i = \Phi_{NL1}(x_1, x_2) + \xi_1(t),$$

$$\mathcal{L} = \Phi_{NL2}(x_1, x_2).$$

В последней модели нелинейность имеет вид  $x_1^2 x_2$ .

Добавим, что в случае пространственно-ограниченных источников в уравнениях вида (2) появляются и пространственные производные.

Случайные вынуждающие силы вызывают в системе флуктуации. За счет нелинейности системы происходит перекачка энергии от одних мод к другим и усиление последних. В результате этого возникают упорядоченные, или когерентные, структуры. Примеры таких структур описаны в работах [56, 57].

В [56] теоретически показано и экспериментально подтверждено, что в магнито-возмущенной полярной ионосфере возникают упорядоченные волновые структуры с длиной волны  $\lambda \sim 100$  км. Их порождают потоковые и токовые неустойчивости, возникающие в высокоширотной ионосфере во время геокосмических бурь.

В работах [11 – 13, 57] описаны обнаруженные квазипериодические когерентные структуры во временных вариациях амплитуд обратно-рассеянных радиосигналов. По-видимому, наблюдаемые когерентные структуры были вызваны пульсирующими потоками электронов из радиационного пояса с энергиями 40 – 100 кэВ, т. е. явились следствием ионосферно-магнитосферного взаимодействия.

Рассмотренные выше примеры в основном относятся к самоорганизации, обусловленной переходом к порядку через флуктуации [44 – 47]. Кроме того, самоорганизация может быть связана с уменьшением числа степеней свободы. Это оказывается возможным благодаря точной компенсации одних процессов другими. Так, например, в результате компенсации нелинейного укручения профиля волны процессом диссипации импульса (вязкостью среды) возникают стационарные образования – ударные волны.

## 4.2. Ударные волны

В простейшем случае они описываются классическим уравнением Бюргерса [58, 59]:

$$v_t + vv_x = \nu v_{xx}, \quad (3)$$

где  $v$  – искомая функция,  $v_t = \partial v / \partial t$ ,  $v_x = \partial v / \partial x$ ,  $\nu$  – коэффициент вязкости. В общем случае  $v = v(x, t)$ , здесь  $x$  – координата,  $t$  – время. Для стационарного образования  $v = v(x - ut)$ , где  $u$  – скорость волнового процесса. При числе Рейнольдса  $Re = 1 |vv_x| = |\nu v_{xx}|$  ширина фронта ударной волны  $\zeta_0 = \nu/u$ .

## 4.3. Нелинейные волны

Приведем пример генерации и распространения нелинейных волн концентрации электронов  $N$  в высокоширотной E-области ионосферы. Как известно, на высотах области E ионосферы при скорости движения электронов, превышающей скорость звука, возбуждается двухпотоковая неустойчивость. Это приводит к усилению неоднородностей  $N$  и к их движению со скоростью  $u$  в направлении, перпендикулярном вектору геомагнитного поля  $\mathbf{B}$  [60, 61]. Для условий в E-области ионосферы можно получить следующее эволюционное нелинейное уравнение:

$$v_t + v_e e^{-v} v_x = D_0 \left( v_{xx} - \frac{1}{c_{si}^2} v_{tt} \right), \quad (4)$$

где  $v = \ln(N/N_0)$ ,  $D_0 = c_{si}^2 \nu_e / \omega_B \omega_{Bi}$ ,  $c_{si} = (k(T_e + T_i) / m_i)^{1/2}$  – скорость ионного звука,  $T_e$  и  $T_i$  – температуры электронов и ионов,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\nu_e$  – частота соударений электронов,  $\omega_B$  и  $\omega_{Bi}$  – циклическая гирочастота электронов и ионов,  $v_e$  – скорость дрейфа электронов относительно ионов. В случае стационарной волны,  $v(x, t) = v(x - ut)$  при  $v(-\infty) = v_0$  и  $v(+\infty) = 0$  для ее скорости имеем выражение:

$$u = v_e \frac{1 - e^{-v_0}}{v_0}.$$

При  $v_0 \approx 2$  или  $\Delta N \approx 10N_0$  и  $v_e \approx 1000$  м/с имеем  $u \approx v_e / 2 \approx 500$  м/с. Важно, что  $u$  лишь незначительно превышает скорость  $c_{si} \approx 400$  м/с. Для линейных же волн  $v_0 \ll 1$  и  $u \approx v_e$ . В

экспериментах найдено, что  $u \approx c_{si}$  [62]. Это означает, что волны были действительно нелинейными.

Если учесть нелинейность в первом приближении (т. е. заменить  $e^{-v}$  на  $1-v$ ) решение уравнения (4) примет вид

$$\frac{N}{N_0} = \left( \frac{N}{N_0} \right)_0^{1+\exp \xi/\xi_0^{-1}},$$

где  $\xi_0 = 2D_0(u^2/c_{si}^2 - 1)/v_0v_e$ ,  $u = v_e(1 - v_0/2)$ .

Общим вопросам теории нелинейных волн посвящен ряд монографий (см., например, [58, 59, 63]).

#### 4.4. Солитоны

В результате точной компенсации нелинейного укручения профиля волны дисперсионным расплыванием возникает стационарное образование в виде классического солитона [55, 58, 59]. В этом случае число Урселла  $Ur \approx 1$ . На воде примером солитона является цунами.

Солитон, возможно, зарегистрирован и в атмосфере [64]. Он генерируется при мощном энерговыделении в атмосфере, в частности, при воздействии потоков корпускул и плазмы солнечного ветра на геокосмосферу. В этом случае практически одномерный пакет внутренних гравитационных волн (ВГВ-солитон) приближенно описывается уравнением

$$v_t + c_s v_x + \alpha v v_x + \beta v_{xxx} = 0, \quad (5)$$

где  $\alpha = 2(\gamma_a^2 - \gamma_a + 1)/\gamma_a^2$ ,  $\gamma_a = 1,4$  – отношение удельных теплоемкостей воздуха,  $\beta = 24H^2 c_s (\gamma_a - 1)^{1/2} / \gamma_a$ ,  $H$  – приведенная высота нейтральной атмосферы,  $c_s$  – скорость звука в атмосфере. Решение уравнения (5) имеет вид

$$v(x-ut) = c_s a_s e^{(z-z_0)/2H} \operatorname{ch}^{-2} (x-ut)/\xi_0,$$

где  $a_s$  – относительная амплитуда солитона на высоте его генерации  $z_0$ ,  $\xi_0 = 2(\beta/u)^{1/2}$ ,  $u = (1/3)c_s \alpha a_s \exp((z-z_0)/2H)$ . Солитон перемещается от места генерации в горизонтальном направлении со скоростью

$$u_s = c_s + u = c_s \left( 1 + \frac{\alpha}{3} a_s e^{(z-z_0)/H} \right).$$

С ростом высоты его скорость и амплитуда растут, а ширина – убывает. Это связано с сохранением плотности кинетической энергии:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const},$$

где  $\rho = \rho(z_0) \exp(-(z-z_0)/H)$  – плотность газа. При этом

$$v(z) = v(z_0) e^{(z-z_0)/2H}.$$

Такое поведение стационарной волны, по-видимому, подтверждается наблюдениями [64]. Впрочем, автор работы [65] считает, что модель классического солитона в условиях опыта [64] не могла реализоваться.

В работе [66] описаны результаты наблюдения уединенной ВГВ в атмосфере Земли во время сильнейшей магнитной бури. Волна двигалась с высоких широт в юго-западном направлении со скоростью около 1,4 км/с. При этом  $u_s > c_s \approx 0,6 - 0,8$  км/с. Эффективная длительность процесса составляла 40 мин, относительная амплитуда возмущений полного электронного содержания с увеличением расстояния убывала от 50 до 5 %.

Другой пример ВГВ солитона описан в [67, 68].

Системам СМСМАЗ и ЗАИМ больше свойственны не классические солитоны, а диссипативные солитоны. Они возникают в открытых системах и являются результатом диссипации (энергии, вещества и т. д.). Приток энергии в систему связан либо с внешним источником (солнечный ветер, атмосферный ветер, взрывы вулканов, землетрясения, старты мощных ракет, молнии и т. д.), либо с производством энергии в системе (конденсация влаги, химические реакции и т. п.). Простейшее уравнение, описывающее диссипативный солитон, имеет вид:

$$v_t + v_0 v_x = v v_{xx} + \alpha_s v^2 - \beta_s v, \quad (6)$$

$$v_0, \alpha_s, \beta_s > 0,$$

где  $v_0$ ,  $\alpha_s$  и  $\beta_s$  – размерные коэффициенты. Амплитуда  $v_m$  солитона определяется балан-

сом скоростей притока и оттока (диссипации) энергии. При этом

$$v(\xi) = v_m \text{ch}^{-2} \xi / \xi_0,$$

где  $v_m = 3\beta_s / 2\alpha_s$ ,  $u_s \approx v_0$ ,  $\xi_0 = 2(v/\beta_s)^{1/2}$ .

Добавим, что соотношение (5) именуется уравнением Кортевега-де Вриза (КдВ) [55]. Комбинация уравнений Бюргерса (3) и КдВ (5) называется уравнением БКдВ [37]:

$$v_t + c_s v_x + \alpha v v_x + \beta v_{xxx} = \nu v_{xx}.$$

Оно описывает, в частности, профиль реальной (с дисперсией) ударной волны.

Примером процессов самоорганизации в электродинамике приземной атмосферы ( $z \leq 10 - 15$  км) являются результаты исследований [69]. Авторами этой работы развита нелинейная модель, описывающая упорядоченные структуры электрического поля и заряда в атмосфере. В частности, ими получено модифицированное уравнение Бюргерса для нахождения нестационарных волновых возмущений заряда конечной амплитуды.

#### 4.5. Нелинейные структуры

Нелинейные структуры во всех подсистемах ЗАИМ в последнее время стали объектом пристального исследования. Так, в книге [70] описаны результаты поиска магнитогидродинамических (МГД) солитонов в магнитосфере и околоземной плазме. Определенное внимание также уделено изучению собственно солитонов, солитонов огибающей, ударных волн с осциллирующей структурой фронта и модуляционных эффектов. На последних остановимся несколько подробнее, так как они имеют непосредственное отношение к взаимодействию ионосферы с магнитосферой. Дело в том, что МГД-волны с периодами 10 – 100 с модулируют параметры ионосферы, вызывая пульсирующие потоки энергичных частиц и пульсирующие полярные сияния, а также генерацию инфразвука с давлением на поверхности Земли  $\Delta p(0) \approx 0,1 - 1$  Па и  $\Delta p(0)/p_0(0) \approx 10^{-6} - 10^{-5}$ . При этом в F-области ионосферы  $\Delta p/p_0 \approx 0,1 - 1$ . По-видимому, пульсирующими потоками элек-

тронов вызваны обнаруженные нами и кратко описанные выше когерентные структуры в верхней части D-области ионосферы (см. также [57]).

В работах [51, 52] дан обзор результатов исследований процессов самоорганизации и нелинейных структур в атмосфере, ионосфере и магнитосфере Земли, проанализированы основные механизмы образования нелинейных вихревых структур в этих оболочках, а также проведено сравнение предсказаний теории с данными наблюдений. Упомянутые работы основывались на уравнении Кадомцева – Петвиашвили, которое, как известно, описывает двумерный солитон [55, 70]:

$$v_t + v v_x + \beta v_{xxx} = \alpha v_{yy},$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – некоторые константы. К двумерным солитонам относятся вихри в атмосферах планет (циклон, Большое Красное Пятно в атмосфере Юпитера, плазменные вихри и др.).

Нелинейные механизмы образования упорядоченных структур в атмосферах планет при значительных энерговыделениях в них обсуждаются в работе [71]. Для этого использовались методы нелинейной динамики плазмы в магнитном поле. Авторами [71] предложен механизм возникновения вихревой структуры, получены оценки пороговой энергии, при которой крупномасштабные вихри становятся долгоживущими.

Особый интерес для системы ЗАИМ в целом представляют ситуации, когда нелинейные структуры в рассматриваемой подсистеме возникают за счет притока энергии из другой подсистемы. Примером такой самоорганизации может служить образование акустико-гравитационных вихрей (уединенных волн) в ионосфере на высотах  $z_0 \approx 110$  км в процессе подготовки землетрясения (ЗТ) или после него [53]. Механизм их генерации заключается в следующем. В результате тектонических процессов возникают сейсмические волны, которые на границе раздела тек-

тоносфера-атмосфера генерируют АГВ, распространяющиеся с малым затуханием практически вертикально вверх до высоты  $z_0$ . Здесь АГВ становятся конвективно неустойчивыми. Распад АГВ завершается генерацией сильно локализованных акустико-гравитационных вихрей. Их размер  $l_r$  не превышает приведенной высоты атмосферы  $H$ , а скорость –  $c_r \leq H\omega_B$ , где

$$\omega_B = \sqrt{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a} \frac{g}{H}}$$

есть частота Брента-Вяйсяля,  $g$  – ускорение свободного падения. При  $H \approx 10$  км имеем  $c_{\max} \approx 170$  м/с. Интересно, что движение акустико-гравитационных вихрей в горизонтальном направлении сопровождается генерацией возмущений магнитного поля:

$$\Delta B \approx \mu_0 e N v_w l_r,$$

где  $e$  – заряд электрона,  $v_w$  – скорость ветра. При  $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ,  $v_w \approx 100$  м/с,  $l_r \approx 10$  км получим  $\Delta B(z_0) \approx 20$  нТл. На уровне Земли в приближении магнитостатики

$$\Delta B(0) = \Delta B(z_0) l_r / z_0^3.$$

Численные оценки дают  $\Delta B(0) \approx 20$  пТл. Такие небольшие значения  $\Delta B(0)$  затрудняют наблюдение вариаций магнитного поля, вызванных прохождением акустико-гравитационных вихрей, но, тем не менее, доступны для регистрации современными магнитометрами.

Другие примеры нелинейных структур (нелинейных волн) обсуждаются в [19, 67, 68, 72, 73].

#### 4.6. Автоволны

К нелинейным структурам в открытых системах относятся так называемые автоволны [48]. Автоволновые процессы в грозовом облаке описаны в работе [74]. Следует ожидать проявления автоволновых режимов и в других подсистемах системы ЗАИМ, которые также являются открытыми нелинейными подсистемами с распределенными источниками энергии, вещества и излучения.

Добавим, что в системах с самоорганизацией могут возникать процессы как спонтанные, так и стимулированные. Существует зависимость величины внешнего воздействия от внутреннего состояния системы. Иначе говоря, для системы, находящейся в метастабильном состоянии, достаточно лишь незначительного по величине воздействия. Например, так осуществляется переход от подготовительной к взрывной фазе суббури в магнитосфере [75].

Таким образом, процессы самоорганизации играют важную роль во всех подсистемах, входящих в систему ЗАИМ. Есть основания считать, что и система в целом является самоорганизующейся. Основными функциями при описании таких систем являются энтропия и негэнтропия. Приток негэнтропии обеспечивает протекание всех физических и химических процессов в открытой системе, а также ее функционирование и самоорганизацию. Полное описание такой системы предполагает задание уравнений баланса энергии, массы, импульса, заряда и энтропии.

### 5. Триггерные механизмы в системе

Триггерный, или спусковой, механизм высвобождения энергии, запасенной в одной подсистеме, при воздействии на нее другой подсистемы является примером свойства эмерджентности. Важно, что взаимодействие между подсистемами может быть не энергетическим, а управляющим. В этом случае слабое по энергетике взаимодействие приводит к более энергичным процессам. Для описания таких процессов удобно ввести коэффициент триггерности, который по своему смыслу равен коэффициенту усиления энергии [11]:

$$K_{tr} = \frac{E}{E_0},$$

где  $E_0$  – энергия первичного, или стимулирующего, процесса,  $E$  – энергия вторичного, или стимулированного, процесса. Интересны ситуации, когда  $K_{tr} > 1$ . Данный коэффициент

является лишь энергетической характеристикой, оценивающей сверху величину коэффициента усиления энергии. Его введение не преследует цель как можно полнее отобразить внутренние свойства подсистем и конкретные физические процессы, составляющие собственно триггерный механизм в подсистемах. Возможность “срабатывания” этих процессов и конкретное значение коэффициента триггерности зависят от сложившихся условий в подсистемах и специфики взаимодействий между ними.

Рассмотрим несколько примеров.

### 5.1. Высыпание энергичных частиц из магнитосферы

Захват альвеновских и свистовых волн (далее волн или излучений) в магнитную силовую трубку, заполненную энергичными частицами, может приводить к возбуждению циклотронной неустойчивости и стимуляции высыпания заряженных частиц из геомагнитной ловушки [37]. Соответствующая совокупность уравнений (отметим – нелинейных), дополненная источником мощности ОНЧ-излучений  $I_w$ , подобна системе из [37]:

$$\frac{dw}{dt} = I_w + \Gamma n w - \nu_w w, \quad (7)$$

$$\frac{dn}{dt} = I_n - \gamma n w, \quad (8)$$

где  $I_n$  – источник энергичных электронов,  $\nu_w^{-1}$  – время становления плотности энергии волн  $w$ ,  $n$  – число энергичных частиц в магнитной силовой трубке, содержащей источник ОНЧ-волн,  $\Gamma \approx 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$  и  $\gamma \approx 10^{12} \text{ м}^3/(\text{Дж} \cdot \text{с})$  – коэффициенты связи (для геомагнитной оболочки  $L \approx 2$ ).

Для расчета  $\Gamma$ ,  $\nu_w$  и  $\gamma$  при других значениях  $L$  необходимо иметь в виду, что [37]

$$\Gamma = \frac{\omega_B}{Nlb}, \quad \nu = 2 \frac{|\ln R_p|}{T_g},$$

$$\gamma = 0,1 \frac{\omega_B}{\varepsilon_M}, \quad \varepsilon_M = \frac{B^2}{2\mu_0},$$

где  $\omega_B$  – циклическая гирочастота электронов на соответствующей  $L$  – оболочке,  $N$  – кон-

центрация электронов холодной плазмы,  $l$  – длина силовой линии,  $b=L^3(4-3/L)^{1/2}$  – пробочное отношение,  $|R_p| \approx 0,3 - 0,5$  – модуль коэффициента отражения волн (по мощности),  $T_g$  – время группового распространения ОНЧ- или альвеновских волн по силовой трубке,  $B$  – значение магнитной индукции для данной  $L$  – оболочки на экваторе,  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Поток частиц в атмосферу через один конец силовой трубки равен

$$\Pi = \frac{1}{2} \gamma n w.$$

Добавим, что для альвеновских волн частота  $f < f_{Bi}$ , а для свистовых  $f < f_B$ , где  $f_{Bi}$  и  $f_B$  – гирочастоты ионов и электронов. Для оболочки  $L \approx 2$  имеем  $f_{Bi} \approx 10^2$  Гц,  $f_B \approx 10^5$  Гц. Источниками альвеновских и свистовых волн являются многие процессы: землетрясения, грозы, ядерные взрывы и др. Посредством этих волн осуществляется взаимодействие подсистем в системе ЗАИМ.

Представим коэффициент триггерности в виде

$$K_{tr} = \frac{|\Delta n| \varepsilon_e}{w L_w},$$

где  $\Delta n = n_0 - n$  – изменение полного числа энергичных частиц в трубке,  $\varepsilon_e$  – энергия этих частиц,  $w$  – плотность энергии волн,  $L_w$  – характерная длина в силовой трубке, занимаемая волнами (при длительности импульса  $\tau$  она равна  $v_g \tau$ , где  $v_g$  – групповая скорость волн, при длительном воздействии  $L_w$  равна длине силовой трубки).

Оказалось, что  $K_{trmax} \approx 10^3 - 10^5$  [11 – 13].

Приведенные оценки свидетельствуют о том, что захват в силовую трубку энергии свистовых волн и последующее развитие циклотронной неустойчивости приводит к стимуляции высыпаний из радиационного пояса энергичных частиц, энергия которых в  $10^2 - 10^5$  раз превышает энергию первичного возмущения. Энергия свистовых волн, сопровождающих сильнейшую молнию, составляет величину  $\sim 10^6$  Дж, а  $\tau \sim 1$  с [76]. При этом

мощность волн  $\sim 10^6$  Вт,  $I_w \approx 3 \cdot 10^{-13}$  Вт/м<sup>3</sup>. Величина же  $I_{wc} \approx 2,5 \cdot 10^{-15} - 2,5 \cdot 10^{-13}$  Вт/м<sup>3</sup> при потоке частиц от внешнего источника (солнечного ветра)  $I_{n0} \approx 10^9 - 10^{11}$  м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Высыпание энергичных частиц из радиационных поясов – одно из проявлений взаимодействия подсистем в системе ЗАИМ. В целом взаимодействие ионосферы с магнитосферой изучается давно и успешно (см., например, [77]).

## 5.2. Солнечно-погодные связи

Спусковые механизмы играют особую роль в объяснении солнечно-погодных связей, точнее, отклика метеопараметров на изменение солнечной активности. Дело в том, что относительное изменение  $k_s$  солнечной постоянной столь незначительно ( $\sim 0,0015$ ), что оно не может напрямую повлиять на мощные тропосферные процессы, ответственные за вариации погоды. С другой стороны, факт наличия упомянутого отклика, само существование которого многие годы было проблематичным, в настоящее время не вызывает сомнения [27].

На сегодняшний день предложено несколько спусковых механизмов, способных объяснить наличие солнечно-погодной связи, – динамический, оптический и электрический [27]. Первый связан с перераспределением энергии планетарных волн при вариации степени нагрева стратосферы и изменении силы ветров в ней, второй – с изменением прозрачности атмосферы, а третий – с изменением степени ионизации в тропосфере и процессов в глобальной электрической цепи [78 – 81]. Последние два механизма рассмотрим несколько подробнее.

*Оптический механизм.* Уменьшение прозрачности атмосферы возникает под действием галактических и солнечных космических лучей (СКЛ), а также рентгеновского излучения Солнца [79]. И лучи, и излучение, проникая глубоко в атмосферу, способствуют образованию ядер конденсации – аэрозолей –

и изменяют концентрации малых примесей (особенно NO<sub>2</sub>). Увеличение концентрации NO<sub>2</sub> приводит к широкополосному поглощению солнечного излучения, а значит, к уменьшению прозрачности атмосферы. В сложном комплексе процессов главную роль, по-видимому, играют вариации интенсивности СКЛ, плотность потока энергии которых велика (см. табл. 1), и рассеяние солнечного света аэрозолями.

Выполним энергетические оценки.

При склонении Солнца, равном 0°, плотность потока энергии солнечного излучения

$$\Pi_p = \frac{\Pi_s}{\pi} \cos \varphi,$$

где  $\Pi_s \approx 1,4 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup> – солнечная постоянная,  $\varphi$  – географическая широта.

Уменьшение прозрачности атмосферы имеет место в диапазоне широт 55 – 75° (средняя широта  $\bar{\varphi} = 65^\circ$ ). Площадь этого участка земной поверхности

$$S = 2\pi R_E \Delta l \cos \bar{\varphi},$$

где  $R_E$  – радиус Земли,  $\Delta l \approx 2200$  км – длина участка дуги меридиана в диапазоне широт  $\varphi = 55 - 75^\circ$ . При этом мощность солнечного излучения, падающая на поверхность площадью  $S$ , равна

$$P = \frac{\Pi_s \cos \bar{\varphi}}{\pi} S = 2\Pi_s R_E \Delta l \cos^2 \bar{\varphi}.$$

Пусть доля мощности  $P_{at}$  поглощаемой в нижней атмосфере, равна  $\eta_1$  (обычно  $\eta_1 \approx 0,4$  [79]). Тогда

$$P_{at} = \eta_1 P.$$

Оценим далее относительную долю мощности  $\eta_2$ , связанную с ослаблением солнечного света аэрозолями. В невозмущенных условиях рассеяние на аэрозолях приводит к значению мощности на уровне Земли

$$P = P_0 e^{-\gamma_0 s},$$

где  $P_0$  – значение мощности в отсутствие аэрозолей,  $\gamma_0 = \alpha \rho_{a0} s$ ,  $\alpha \approx 3 \cdot 10^2$  м<sup>2</sup>/кг,  $\rho_{a0}$  – объемная плотность аэрозолей,  $s$  – путь, пройденный солнечными лучами в слое атмосферы с



аэрозолями. Обычно  $\rho_{a0} \approx 10^{-8}$  кг/м<sup>3</sup> (см. [26]). При  $s = 10$  км имеем  $\gamma_0 \approx 3 \cdot 10^{-2}$ .

Усиление солнечной активности приводит к увеличению объемной плотности аэрозолей  $\rho_a$  в 2 – 4 раза [80]. Полагая в среднем  $\rho_a/\rho_{a0} = 3$ , получим  $\gamma \approx 9 \cdot 10^{-2}$ ,  $\eta_2 = \Delta\gamma = \gamma - \gamma_0 = 6 \cdot 10^{-2}$ .

Уменьшение прозрачности нижней атмосферы вызывает падение мощности солнечного излучения у поверхности Земли на величину

$$\Delta P = \eta_2 P_{at} = 2\eta_1 \eta_2 \Pi_s R_E \Delta l \cos^2 \bar{\varphi}.$$

Оценки по этой формуле дают  $\Delta P = 2,6 \cdot 10^{14}$  Вт. Таких вариаций мощности, поступающей в атмосферу, достаточно для изменения зональной циркуляции нижней атмосферы. Действительно, мощность этой циркуляции

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_0 v_w^3 S_w = \pi \rho_0 v_w^3 R_E H \cos \bar{\varphi},$$

где  $\rho_0 \approx 1,3$  кг/м<sup>3</sup> – плотность атмосферного газа у поверхности Земли,  $v_w$  – скорость ветра,  $S_w$  – площадь, нормальная к направлению ветра. При  $v_w = 10$  м/с,  $\bar{\varphi} = 65^\circ$ ,  $H \approx 8$  км получим  $P_w \approx 2,1 \cdot 10^{14}$  Вт. Видно, что  $\Delta P$  и  $P_w$  действительно близки между собой.

Оценим  $K_{tr}$ . Если уменьшение прозрачности атмосферы вызвано увеличением потока СКЛ на площади  $S$ ,

$$K_{tr} = \eta_1 \eta_2 \frac{\Pi_s}{\Pi_{scr}} \frac{\Delta t_a}{\Delta t_{scr}} \frac{\cos \bar{\varphi}}{\pi},$$

где  $\Delta t_a$  – продолжительность уменьшения прозрачности атмосферы,  $\Delta t_{scr}$  – продолжительность активности СКЛ,  $\Pi_{scr}$  – плотность потока энергии СКЛ. Полагая  $\Delta t_a = 3$  суток,  $\Delta t_{scr} = 10^2 - 10^5$  с,  $\Pi_{scr} = 2$  Вт/м<sup>2</sup> (см. табл. 1), получим  $K_{tr} = 10 - 10^4$ .

Таким образом, имеет место триггерный эффект. Его продолжительность не превышает  $\Delta t_a \approx 3$  суток [71].

Полезно сравнить оцененную выше мощность  $\Delta P$  с изменением мощности солнечного излучения в результате вариаций солнечной постоянной. Их отношение равно

$$K = \frac{\eta_1 \eta_2}{k_s} \frac{\Delta t_a}{\Delta t_s},$$

где  $k_s = 0,0015$  (см. выше),  $\Delta t_s$  – продолжительность солнечной вспышки. Полагая, как и выше,  $\eta_1 = 0,4$ ,  $\eta_2 = 0,06$ ,  $\Delta t_a = 3$  суток,  $\Delta t_s = 300$  с, получим  $K \approx 1,6 \cdot 10^5$ . Такие большие значения  $K$  поясняют, почему солнечные вспышки не могут напрямую отвечать за солнечно-погодные связи.

Следовательно, прозрачность атмосферы изменяется под действием СКЛ, которые проникают в нижнюю атмосферу преимущественно в высоких широтах ( $\varphi = 55 - 75^\circ$ ). Образовавшиеся под действием этих лучей аэрозоли переносятся ветром в более низкие широты. Аэрозоли в тропосфере существуют не более 5 – 10 суток [26]. При скорости ветра 5 – 10 м/с они переносятся на расстояние  $R \approx 2,5 - 10$  тыс. км. С ростом  $R$  их концентрация постепенно убывает, а значит, уменьшается  $\Delta\gamma$  и  $\Delta P$ , что и наблюдается в действительности [81].

*Электрический механизм.* Главная роль в глобальной электрической цепи отводится, по-видимому, грозovým облакам [82]. При рассмотрении данного механизма основным процессом, приводящим к высвобождению накопленной в атмосфере энергии, является конденсация водяных паров на заряженных ядрах в грозových облаках. Коэффициент триггерности при этом равен

$$K_{tr} = \frac{E_{c1}}{\varepsilon_i} = \frac{q_c m_1}{\varepsilon_i} = \frac{q_c \rho V_1}{\varepsilon_i},$$

где  $E_{c1}$  – выделенная при конденсации пара скрытая энергия одного ядра массой  $m_1$  и объемом  $V_1$ ,  $\rho \approx 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воды,  $\varepsilon_i \approx 10 - 15$  эВ – потенциал ионизации молекул воздуха,  $q_c \approx 2,6 \cdot 10^6$  Дж/кг – удельная теплота парообразования. При  $\varepsilon_i \approx 2 \cdot 10^{-18}$  Дж, радиусе капли 2 мкм имеем  $m_1 \approx 4 \cdot 10^{-15}$  кг. Тогда  $K_{tr} \approx 5 \cdot 10^9$ .

Триггерный механизм, способствующий вариациям атмосферного электричества в результате изменений интенсивности пото-

ков солнечных и космических лучей, обсуждается также в книге [83].

### 5.3. Ионосфера – триггер магнитосферных возмущений

В работе [84] высказана гипотеза, согласно которой пространственно-неоднородный поток плазмы из ионосферы в магнитосферу и возникновение на экваторе магнитосферы плазменных облаков может вызывать стимулированные процессы пересоединения в плазменном слое и авроральные возмущения. Важно, что затравочные потоки плазмы можно создавать искусственным путем, например, инжектируя пучки ионов. В естественных условиях потоки плазмы возникают в результате процессов в тектоносфере, приземной и верхней атмосфере, в результате магнитосферно-ионосферного взаимодействия и т. п.

### 5.4. Триггерные эффекты приливов

Приливы на Земле, вызванные Луной и Солнцем, по-видимому, могут оказывать влияние на сейсмическую деятельность планеты [85]. Приливные напряжения не превышают  $\sigma \approx 3 \cdot 10^4$  Н/м<sup>2</sup>. В то же время при землетрясениях (ЗТ) напряжения достигают  $\sigma_q \approx 3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>. Видно, что  $\sigma \ll \sigma_q$ . Важно, однако, что величина  $d\sigma/dt \approx 1$  Н/(м<sup>2</sup>·с), а  $d\sigma_q/dt \approx 4 \cdot 10^{-3}$  Н/(м<sup>2</sup>·с). Кроме того,  $\sigma(t)$  изменяется во времени с периодом  $T = 12$  ч. Триггерный эффект проявляется, вероятно, лишь на конечной стадии подготовки ЗТ, когда система находится в метастабильном состоянии. Прилив может двояко влиять на тектонические процессы: непосредственно, модулируя  $\sigma$  и, опосредованно, изменяя давление газа в атмосфере. Скорее всего, имеет место синергетическое воздействие.

Таким образом, триггерные процессы свойственны как подсистемам, так и системе ЗАИМ в целом. Важно, что коэффициент триггерности может быть большим ( $\sim 10 - 10^3$ ) и даже исключительно большим ( $\sim 10^9 -$

$10^{10}$ ). Существование триггерных эффектов во всех геосферах свидетельствует о принципиальной реализуемости так называемого геофизического оружия (обсуждение этого вопроса выходит за рамки настоящей работы).

## 6. Высокоэнергичные явления в системах СМСМИАЗ и ЗАИМ

Взаимодействие между подсистемами в системах СМСМИАЗ и ЗАИМ имеет место и в “спокойных” условиях, но особенно четко оно проявляется при эпизодических значительных энерговыделениях в одной из подсистем. К таким энерговыделениям относятся сильные землетрясения, извержения мощных вулканов, грозы, мощные атмосферные динамические процессы, солнечный терминатор, затмения Солнца, вспышки на Солнце, магнитные бури и другие высокоэнергичные явления. Исследованию процессов, сопровождающих такие явления, посвящено большое количество работ (см., например, [3, 4, 24, 25, 86 – 89]). Рассмотрим некоторые процессы подробнее.

### 6.1. Землетрясения

Этот источник, по-видимому, был первым из высокоэнергичных источников, заставивших пересмотреть взгляды на роль потоков энергии “снизу”. До этого считалось, что процессы в геокосмосфере определяются лишь потоками энергии “сверху”.

Энергия и мощность сильнейших ЗТ достигает  $\sim 10^{19}$  Дж и  $10^{17}$  Вт соответственно. Эти же величины для акустического (инфразвукового) излучения ЗТ на 3–4 порядка меньше. Весьма значительна и энергетика электромагнитного излучения в очаге ЗТ (табл. 3) [34].

Еще в 60-е годы XX века надежно установлено, что сильные ЗТ оказывают влияние на атмосферу и ионосферу [90 – 93]. Затем было показано, что ЗТ сопровождаются возмущениями магнитосферы, в частности, ва-

риациями геомагнитного поля и высыпанием энергичных частиц из радиационного пояса Земли [94 – 96]. Интересно, что эффекты во всех подсистемах возникают не только после

свершившихся ЗТ, но и на стадии их подготовки [4, 6 – 8, 97, 98]. Поэтому в конце минувшего века был поставлен вопрос о

Таблица 3. Энергетические характеристики полей сейсмического происхождения (энергия землетрясения –  $10^{19}$  Дж)

Поле	Энергия, Дж	Мощность, Вт	Продолжительность, с	Примечание
Электромагнитное: $f \leq 10$ Гц	$10^{10} - 10^{11}$	$10^8$	$10^2 - 10^3$	Достигает ионосферы и магнитосферы
$f = 10^3 - 10^4$ Гц	$10^{13} - 10^{14}$	$10^{11}$	$10^2 - 10^3$	То же
$f = 10^5 - 10^6$ Гц	$10^{15} - 10^{16}$	$10^{13}$	$10^2 - 10^3$	Сильно ослабляется в литосфере
Электрическое	$10^9$	$10^4 - 10^6$	$10^3 - 10^5$	Достигает ионосферы
Магнитное	$10^{10}$	$10^8$	$10^2$	То же
Инфразвуковое	$10^{15} - 10^{16}$	$10^{13} - 10^{14}$	$10^2$	Достигает высот ~300 км
АГВ	$10^{15} - 10^{16}$	$10^{11} - 10^{12}$	$10^3 - 10^4$	Достигает высот 100 – 150 км

разработке систем предупреждения ЗТ с использованием комплекса предвестников во всей системе ЗАИМ [87, 99, 100]. Возможность решения сложнейшей проблемы прогнозирования ЗТ представляется реальной, хотя до конца не поняты механизмы генерации предвестников ЗТ в системе ЗАИМ и, особенно, в геокосмосфере. По-видимому, за передачу возмущений из тектоносферы во внешние геосферы ответственны квазистатические электрические и магнитные поля, электромагнитные волны в достаточно широком диапазоне частот (табл. 3), а также акустико-гравитационные волны. В работе [101] разработана электродинамическая модель ионосферных предвестников ЗТ, хорошо объясняющая почти весь комплекс наблюдаемых явлений.

Размер очага ЗТ редко превышает 100 – 1000 км (или  $1 - 10^\circ$ ). В то же время размер возмущенной зоны в геокосмосфере, как показали наблюдения на спутниках, имеет три характерных масштаба [99].

Первая зона по широте простирается на  $\pm 300$  км ( $\pm 3^\circ$ ) от очага. Здесь отмечается усиление атмосферной эмиссии на длинах волн 557,7 и 630 нм и вариации уровня излучения на частотах  $\sim 10 - 10^2$  Гц.

Размер второй зоны по широте достигает  $\pm 600 - 700$  км ( $\pm 6^\circ$ ) относительно очага. В этой зоне фиксируются электромагнитные излучения в диапазоне 1 – 10 Гц, плазменные неоднородности, геомагнитные пульсации и квазистатические электрические поля.

Третья зона по широте удалена на  $\pm 3000$  км ( $\pm 30^\circ$ ) от границы очага. Здесь наблюдаются вариации высотного профиля  $N$ , изменения ионного состава, высыпание энергичных электронов из радиационного пояса и всплески ОНЧ-излучения.

По долготе размер возмущенной ЗТ зоны в 2 – 3 раза протяженнее, чем по широте.

В целом с ростом высоты размер этой зоны увеличивается и принимает форму сплюсненной по широте “воронки” (см. также [4]).

Возмущения от ЗТ распространяются также в горизонтальном направлении. Наиболее понятным механизмом переноса возмущений являются АГВ и сейсмические волны. Скорость последних изменяется от 3 – 4 до 6 – 8 км/с [102]. Менее изучена роль медленных магнитогидродинамических (МГД) и гиротропных волн [6, 103].

Благодаря слабозатухающим волновым процессам возмущения от ЗТ могут стать не только крупномасштабными (характерный

размер  $L_c \sim 1000$  км), но и глобальными, когда  $L_c \sim 10000$  км.

Проведенные нами радиофизические исследования эффектов, сопровождавших ЗТ, кратко описаны в [28 – 33, 104]. Ретроспективный анализ выполнен примерно для сотни ЗТ с магнитудой 6 – 9, имевших место в 1970 – 1990-е годы. Подтверждено, что ЗТ вызывали возмущения во всех областях ионосферы и носили крупномасштабный и даже глобальный характер. Наблюдались как аperiодические, так и квазиperiодические процессы. В D-области ионосферы величина квазиperiода  $T$  составляла 2 – 3, 5 – 6 мин, в E и F-областях ~5 – 10 и 10 – 60 мин соответственно. Продолжительность реакции в среднем порядка 10, 10 – 20 и 20 – 60 мин соответственно.

На расстояниях  $R \leq 2000 - 3000$  км от эпицентра кажущиеся скорости  $v$  волновых процессов составляли 0,3 – 0,7 км/с (для нижней и средней ионосферы), 1 – 2 и 3 – 4 для E и F-областей. Реже регистрировались процессы с  $v \approx 5 - 6$  и 8 – 10 км/с. Неуверенно наблюдались эффекты, которым соответствовало значение  $v \sim 10 - 100$  км/с.

Важно, что наряду с регулярными вариациями характеристик радиосигналов имели место их флуктуации. Это означает, что ЗТ вызывают как регулярные, так и случайные изменения параметров ионосферной плазмы.

Наблюдались также вариации статистических характеристик радишумов в диапазоне частот ~1 кГц – 1 ГГц [30, 31].

Результаты наших исследований дополняют данные, приведенные в работах [105 – 120].

## 6.2. Вулканизм

Извержение вулканов (ИВ) относится к одному из высокоэнергичных источников, способных существенно повлиять на систему ЗАИМ. Энерговыведение для сильнейшего ИВ достигает  $E_v \approx 10^{20}$  Дж, а средняя мощность –  $10^{15}$  Вт. Для взрывных вулканов в

энергию воздушных волн переходит около 0,01 % от  $E_v$ , т. е.  $10^{16}$  Дж, их мощность составляет  $10^{14} - 10^{15}$  Вт. Энергетика ЗТ, сопровождающего ИВ, примерно такая же.

Эффекты, возникающие при ИВ, по видимому, отчасти подобны тем, что сопутствуют ЗТ. Однако есть и существенное отличие. ИВ приводит к выбросу большого количества пепла, образованного из вулканических газов и аэрозолей, в том числе и с размерами частиц 0,1 – 1 мкм. Попав в стратосферу (высоты 20 – 30 км), эти частицы находятся там в течение  $\Delta t \approx 0,5 - 3$  года. Запыленная стратосфера способствует поглощению и рассеянию солнечного света, в результате чего поверхность Земли недополучает определенное количество теплоты  $\Delta Q$ . На Земле наступает “вулканическая” зима. В системе ЗАИМ это явление относится к триггерным. Для оценки  $K_{tr} = \Delta Q/E_{sp}$  в [11, 13, 19] вычислена потенциальная энергия стратосферных частиц

$$E_{sp} = M_{sp}gh = k_{sp}Mgh,$$

где  $M$  – полная масса выброшенного при ИВ вещества,  $M_{sp}$  – масса вещества с размерами частиц 0,1 – 1 мкм,  $k_{sp} = M_{sp}/M$ ,  $h$  – средняя высота расположения частиц в стратосфере.

Коэффициент триггерности можно вычислить иным способом, определив его как отношение энергии экранированного аэрозолями солнечного излучения к потенциальной энергии аэрозолей, т. е.

$$K_{tr} = \frac{E_s}{M_{sp}gh} = \frac{P_0 - P}{M_{sp}gh} \Delta t = \frac{\Delta \Pi_s S \Delta t}{M_{sp}gh},$$

где  $\Delta \Pi_s$  – изменение потока энергии солнечного излучения,  $S$  – площадь экранируемого участка земной поверхности,  $\Delta t = h/v_{sp}$  продолжительность экранирования, равная времени оседания аэрозолей,  $v_{sp}$  – скорость оседания аэрозолей. При  $\gamma_{sp} \ll 1$  имеем

$$P_0 - P = P_0 \gamma_{sp} = P_0 \alpha \rho_{sp} s = P_0 \alpha \frac{M_{sp}}{S \Delta z_s} s = P_0 \alpha \frac{M_{sp}}{S \cos \chi}.$$

Здесь  $\chi$  – зенитный угол (подразумевается, что  $\chi \leq 80^\circ$ , при этом слой с аэрозолями может считаться плоским). Поскольку  $\Pi_s = \Pi_s(0) \cos \chi$  (при  $\chi \leq 80^\circ$ ),

$$E_s = P_0 \alpha \frac{M_{sp}}{S \cos \chi} \Delta t = \Pi_s(0) \alpha M_{sp} \Delta t.$$

В этом случае

$$K_{tr} = \frac{\Pi_s(0) \alpha \Delta t}{gh} = \frac{\Pi_s(0) \alpha}{g v_{sp}}.$$

Полагая  $\Pi_s(0) = 600 \text{ Вт/м}^2$ ,  $v_{sp} = 10^{-3} \text{ м/с}$  и  $\alpha = 10^2 - 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$ , получим  $K_{tr} = 6 \cdot 10^6 - 6 \cdot 10^7$ . С учетом широтной зависимости и продолжительности светлого времени суток в среднем для всей земной поверхности значение  $K_{tr}$  уменьшится почти на порядок, но будет оставаться очень большим ( $10^6 - 10^7$ ).

Заметим, что последняя формула для  $K_{tr}$  является достаточно универсальной: коэффициент триггерности зависит лишь от скорости оседания аэрозолей, которая определяется только их размерами и для заданного размера аэрозоля остается практически константой.

Другие эффекты извержений вулканов, существенные для взаимодействия подсистем в системе ЗАИМ, описаны в работах [121 – 124].

Таким образом, извержения сильнейших вулканов приводят к существенной и длительной (~1 года) перестройке теплового (и не только теплового) режима в системе ЗАИМ.

### 6.3. Глобальная грозовая активность

Распространение вызванных молниевыми разрядами электромагнитных сигналов в ионосфере и магнитосфере изучается более 80 лет. Но лишь относительно недавно была понята роль этих сигналов во взаимодействии подсистем в системе ЗАИМ.

Одновременно на Земле наблюдается около 2000 гроз и грозowych облаков [76, 82]. Средняя продолжительность электрической активности одного облака составляет около 30 мин. На земном шаре за сутки образуется ~ $10^5$  грозowych облаков, объем каждого из них ~ $100 \text{ км}^3$ . При водности облака  $3 \text{ г/м}^3$  его масса составляет около  $3 \cdot 10^8 \text{ кг}$ . Это означает, что при конденсации водяного пара в одном облаке выделяется количество теплоты около

$7 \cdot 10^{14} \text{ Дж}$ , а во всех грозowych облаках – около  $7 \cdot 10^{19} \text{ Дж}$ . Им соответствуют мощности порядка  $10^{10}$  и  $10^{15} \text{ Вт}$ . Такой энергетике достаточно для изменения циркуляционных процессов в нижней атмосфере, развития циклонов и антициклонов, для генерации АГВ и для воздействия на подсистемы ЗАИМ.

Кроме такого воздействия, имеет место и электромагнитное воздействие. Энергия и мощность сильнейшей молнии ~ $10^{10} \text{ Дж}$  и  $10^{10} \text{ Вт}$ . При их количестве ~1000 суммарная энергия и мощность молний составляет  $10^{13} \text{ Дж}$  и  $10^{13} \text{ Вт}$ . В акустические и электромагнитные волны преобразуется ~0,1% и 0,01 – 0,1 % энергии молнии. Поэтому энергия этих волн, генерированных 1000 молний, достигает  $E_a \approx 10^{10} \text{ Дж}$  и  $E_{em} \approx 10^9 - 10^{10} \text{ Дж}$ .

Поток энергии и плотность этого потока электромагнитного излучения от сильнейшей молнии на высоте около 100 км составляют  $10^{-5} - 10^{-4} \text{ Дж/м}^2$  и  $10^{-5} - 10^{-4} \text{ Вт/м}^2$ .

Разряд молнии вызывает нагрев электронов (на ~10 – 100 % в D-области ионосферы, существенное увеличение электронной концентрации, свечение газа и другие явления, которые активно изучались в конце XX-го века. Особенно популярными были исследования бьющих вверх молний.

Потоки энергии электромагнитного излучения от грозowych разрядов достаточно велики, чтобы перестроить взаимодействие подсистем в системе ЗАИМ, вызвать выпадение частиц из радиационного пояса Земли в атмосферу и последующие вторичные процессы.

### 6.4. Мощные атмосферные процессы

К ним относятся циклоны (антициклоны), струйные течения, ураганы, смерчи и др. Их энергетика – велика [34]. Например, энергия и мощность циклона достигают значений  $10^{19} - 10^{20} \text{ Дж}$  и  $10^{13} - 10^{15} \text{ Вт}$ . Немного уступают по энергетике циклонам ураганы и струйные течения. Смерчи (торнадо) отличаются исключительно высокой концентрацией

мощности ( $\sim 100 \text{ Вт/м}^3$ ). Для циклона эта величина на 4 порядка меньше.

Мощные атмосферные процессы сопровождаются генерацией АГВ и, в частности, инфразвука. АГВ, распространяясь не только в горизонтальном направлении, но и вверх, достигают высот  $\sim 200$  и даже  $300 \text{ км}$ . Так осуществляется связь между подсистемами.

Расчеты эффектов, вызванных АГВ, выполнены в [125 – 130] (см. также подраздел 6.5).

АГВ, генерируемые метеопроцессами, распространяются вверх и достигают верхней атмосферы и ионосферы. Так осуществляется “проецирование” этих процессов на процессы в вышележащих подсистемах. Эти вопросы исследуются уже много лет (см., например, [1, 2]). К современным относятся, в частности, работы [128 – 130].

Таким образом, мощные атмосферные процессы должны оказывать влияние на взаимодействие подсистем в системе ЗАИМ. Более того, имеет место взаимодействие атмосферной и космической погодных систем [128, 129].

### **6.5. Тропические циклоны**

О влиянии мощных метеопроцессов на верхнюю атмосферу подозревали давно, но лишь в последнее время получены убедительные доказательства этого (см., например, [128, 131, 132]). Обычные (внетропические) циклоны существуют почти всегда. Это означает, что их воздействие на верхнюю атмосферу может быть регулярным. Отличие тропического циклона (ТЦ) от обычного циклона состоит в наличии взаимодействия океана с нижней атмосферой.

В работах [131, 132] представлены результаты спутниковых измерений (высота ИСЗ  $z \approx 950 \text{ км}$ ) вариаций квазистационарного электрического поля над районами зарождения и развития ТЦ. Оказалось, что ТЦ приводит к генерации биполярных изменений

электрического поля с амплитудой  $10 - 20 \text{ мВ/м}$ . При спутниковых измерениях длительность этого процесса равна около  $2 - 3 \text{ мин}$ . Горизонтальный размер возмущенной области в ионосфере при этом составляет  $1 - 1,5 \text{ тыс. км}$ . Результаты работ [131 – 133] позволяют считать, что ТЦ является одним из элементов системы океан–атмосфера–ионосфера–магнитосфера и обеспечивает взаимодействие перечисленных подсистем. Выяснение проявлений ТЦ в верхней атмосфере и геокосмосе позволит продвинуться в понимании фундаментальных процессов в системе. В этом состоит научная значимость исследований ТЦ как элемента указанной системы. Изучение реакции ионосферы и магнитосферы на зарождение и развитие ТЦ имеет также большую практическую значимость. Дело в том, что средний ТЦ обладает кинетической энергией, превышающей энергию сильнейшего землетрясения [34, 134]. ТЦ относится к наиболее разрушительным крупномасштабным атмосферным образованиям на нашей планете. Известны циклоны со скоростью ветра, превышающей  $100 \text{ м/с}$ , и радиусом вихря, достигающим  $750 \text{ км}$ . Дефицит давления в центре ТЦ иногда приближался к  $150 \text{ гПа}$ . Кроме того, в течение последних десятилетий частота генерации таких циклонов непрерывно возрастает [132]. Вместе с этим возрастает опасность, которую несут в себе тропические циклоны для человека. Поэтому актуальной проблемой является создание надежной сети спутникового мониторинга ТЦ. Для ее успешного решения требуется тщательное изучение всей цепочки процессов от зарождения первичного вихря до воздействия ТЦ на параметры атмосферы, ионосферы и магнитосферы, разработка соответствующей модели процессов, а также выполнение оценок сопутствующих эффектов [130].

*Общие сведения о взаимодействиях в подсистеме ОСА.* ТЦ, как и другие метеорологические объекты, формируется в результате взаимодействий составляющих в подсистеме

теме ОСА. Этой подсистеме свойственны процессы самовозбуждения. ТЦ развивается после возникновения начального вихря в атмосфере. Существует несколько механизмов образования этого вихря: генерация вихря резкой неоднородностью поверхности суши, над которой движется поток воздуха, генерация вихря на метеорологическом фронте или мощными скоплениями кучевых облаков.

Начальный вихрь далее усиливается при набегании менее нагретого воздуха на теплую поверхность океана (температура которой больше критического значения  $t_c \approx 26,5^\circ\text{C}$ ). Океан, точнее его верхние слои толщиной  $h_1 \approx 10 - 100$  м, отдает свое тепло развивающемуся вихрю. Тепло расходуется как на нагрев воздуха, так и на испарение океанской воды и увеличение кинетической энергии вихря. Водяные пары, поднимаясь вверх, конденсируются и отдают тепло воздуху в циклоне. Когда температура воды  $t_1$  станет меньше температуры воздуха, воздух начинает нагревать поверхностный слой океана. Возникает затухающий колебательный процесс, который мы далее будем описывать круговой частотой колебаний  $\omega_1$  и декрементом  $\gamma$ .

Скорость воздуха в ТЦ увеличивается за счет потребления тепла от поверхностного слоя воды в океане, а релаксирует она в результате трения воздуха в вихре о поверхность океана. Важно, что сила трения пропорциональна квадрату скорости ветра в вихре  $v^2$ .

Поверхностный слой воды в океане охлаждается, возникает подъем (апвеллинг) холодной воды из глубин и ее перемешивание с теплой водой у поверхности. Стационарное значение температуры воды  $t_f$  в поверхностном слое определяется балансом тепла солнечного происхождения. В период существования ТЦ обычно  $t_f \approx 27 - 30^\circ\text{C}$ . Добавим, что интенсивность апвеллинга определяется интенсивностью турбулентного трения, которая пропорциональна  $v^2$ . Таким образом, уравне-

ние баланса тепла в поверхностном слое океана и уравнение баланса кинетической энергии вращательного движения в вихре являются нелинейными. Это означает, что и система ОСА, и процессы в ней будут нелинейными.

*Взаимодействие океана с ТЦ.* Положим, что уравнение баланса температуры поверхностного слоя воды в океане имеет вид, подобный [133]:

$$\frac{dt_1}{dt} = -b_1 (t_1 - t_{1m}) v_0^2 + \frac{t_f - t_1}{\tau}, \quad (9)$$

где  $b_1 \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{сут}^{-1}$ ,  $v_0$  – тангенциальная скорость на внутренней границе ТЦ радиусом  $r_0$ ,  $\tau$  – характерное время,  $t_f$  – температура поверхностного слоя воды в океане в сезон существования ТЦ (обычно  $t_f = 28 - 30^\circ\text{C}$ ),  $t_{1m}$  – температура холодных слоев воды (можно полагать  $t_{1m} = 23^\circ\text{C}$ ). Первое слагаемое в правой части соотношения (9) описывает охлаждение слоя воды в океане в результате его взаимодействия с ТЦ. Второе слагаемое – восстановление температуры воды в упомянутом слое после прохождения циклона с характерным временем  $\tau \approx 10$  суток.

Уравнение (9) необходимо решать совместно с соотношением для  $v_0$ . Заметим, что ТЦ развивается лишь при  $t_1 > t_c$ , где  $t_c \approx 26,5^\circ\text{C}$  – критическое значение температуры воды. Будем считать, что отбирать тепло у океана циклон продолжает и при  $t_c > t_1 > t_{1m}$ . При этом имеем:

$$\frac{dv_0}{dt} = a_0 \frac{t_1 - t_{1m}}{t_f - t_{1m}} \left( 1 + \frac{\kappa v_1}{v_0} \right) - b_0 v_0^2, \quad (10)$$

где  $\kappa \approx 1/12$  [130],  $v_1 \approx 5 - 10$  м/с – скорость поступательного движения ТЦ,  $a_0$  и  $b_0$  – размерные коэффициенты, которые вычисляются теоретически либо определяются из данных наблюдений (можно полагать  $a_0 \approx 45 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ ,  $b_0 \approx 2.7 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с} \cdot \text{сут}^{-1}$  [130]).

В работе [130] показано, что система уравнений (9) и (10) может описывать нелинейные затухающие колебания температуры поверхностного слоя океана  $t_1$  и тангенциальной скорости ТЦ  $v_0$  вокруг стационарных

значений  $t_s$  и  $v_s$ . При других значениях параметров взаимодействия подсистем процесс возврата к  $t_s$  и  $v_s$  может быть аperiodическим.

*Роль ТЦ во взаимодействиях в системе океан – атмосфера – ионосфера – магнитосфера.* Известно, что циклоническая деятельность и волнение океана способствуют генерации АГВ, которые, достигая верхней атмосферы (высоты 100 ÷ 300 км), нагревают ее. Нагрев сопровождается, в частности, изменением проводимости  $\sigma_i$  ионосферной плазмы на высотах токовой струи (~ 100 ÷ 150 км). Вариации  $\sigma_i$  вызывают генерацию геомагнитных возмущений, которые распространяются в магнитной оболочке планеты – магнитосфере. Последние приводят к возмущению адиабатических инвариантов частиц, захваченных в геомагнитные ловушки, перераспределению по питч-углам заряженных частиц и высыпанию их определенной доли в верхние слои атмосферы. Возникает взаимодействие океан – циклон – верхняя атмосфера – ионосфера – магнитосфера – верхняя атмосфера. Такой механизм взаимодействия естественно называть акустико-гравитационным. Его реальность, точнее реальность отдельных звеньев механизма, подтверждаются экспериментальными результатами работы [128, 129].

В основе второго механизма взаимодействия подсистем лежат электродинамические процессы. Циклоническая деятельность стимулирует интенсивные испарения океанической воды, ее последующую конденсацию, развитие мощной облачной структуры, возникновение гроз. Разряд молнии вызывает нагрев электронов и увеличение концентрации электронов плазмы нижней ионосферы (высоты 50 ÷ 100 км). Потоки энергии и мощности электромагнитного излучения от грозовых разрядов достаточно велики, чтобы перестроить взаимодействие подсистем верхняя атмосфера – ионосфера – магнитосфера, вызвать высыпание частиц из радиационного пояса Земли в верхнюю атмосферу и после-

дующие за этим вторичные процессы. К ним, в частности, относятся следующие. Высыпание частиц способствует увеличению проводимости плазмы на высотах динамо-области (~ 100 ÷ 150 км), что обуславливает изменение электрического поля поляризации, которое, проникая в магнитосферу, взаимодействует с энергичными частицами радиационного пояса, стимулируя их дальнейшее высыпание. Так осуществляется повторное взаимодействие между подсистемами посредством электродинамического механизма.

В основе третьего механизма лежит возникновение стороннего тока в грозовых облаках на высотах до 10 ÷ 15 км, плотность которого на несколько порядков превышает фоновое значение. В результате этого во всей толще ионосферы примерно над ТЦ и его окрестностями на 1 ÷ 2 порядка увеличивается квазистационарное электрическое поле. Это было обнаружено и описано авторами работ [131, 132]. Упомянутое поле, незначительно ослабляясь, проникает в магнитосферу и оказывает влияние на движение захваченных в геомагнитную ловушку энергичных заряженных частиц. При определенных условиях электрическое поле будет способствовать высыпанию определенной доли этих частиц в верхнюю атмосферу. Далее возникает повторное взаимодействие подсистем.

Результаты расчетов основных параметров взаимодействующих подсистем в зависимости от энергии первичного источника – поверхностного слоя океана – приведены в табл. 4 [130]. Здесь  $r_0$  и  $R_0$  – внутренний и внешний радиусы ТЦ,  $V_0$  – значение скорости в ТЦ при  $R = r_0$ ,  $\delta p_m(R_0)$  – среднее квадратичное значение амплитуды давления в АГВ,  $S_r$  – площадь излучателя АГВ,  $z_0$  – высота, где начинают сказываться нелинейные эффекты в АГВ.

*Генерация АГВ подсистемой океан – циклон.* Получим выражения для амплитуды и спектра АГВ. ТЦ порождает турбулентность. Вследствие нелинейности уравнений гидро-



динамики турбулентность служит источником АГВ в широком диапазоне частот  $\Omega$ . Высокочастотная ( $\Omega > \omega_A$ ) и низкочастотная ( $\Omega < \omega_B$ ) составляющие АГВ обычно именуется акустическими и внутренними гравитационными волнами (ВГВ). Здесь  $\omega_A^2 = \gamma_a g / 4H \equiv$

$\equiv \alpha_0 \omega_B^2$ ,  $\omega_B^2 = \gamma_a - 1 g / \gamma_a H$ ,  $\omega_A$  и  $\omega_B$  частоты отсечки акустических волн и ВГВ соответственно [125].

Для изучения влияния ТЦ на атмосферу и ионосферу целесообразно оценить амплитуду пульсаций давления воздуха, которая

Таблица 4. Зависимость основных параметров подсистемы океан – тропический циклон от температуры океаном внутренней энергии (интенсивности ветра в циклоне).

$v_0$ , м/с	$V_0$ , м/с	$v_1$ , м/с	$r_0$ , км	$R_0$ , км	$\delta p_m(R_0)$ , Па	$\Pi_r$ , Вт/м <sup>2</sup>	$P_r \cdot 10^{-12}$ , Вт	$S_r \cdot 10^{-12}$ , м <sup>2</sup>	$z_0$ , км
15	15,8	3	10	400	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-7}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	0,5	280
20	21	4	10	425	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	0,57	250
25	26,3	5	11	450	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	0,64	230
30	31,5	6	11	475	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	0,71	220
35	36,8	7	12	500	0,5	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	0,79	200
40	42	8	13	530	0,84	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,88	195
50	52,5	10	14	570	2,1	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$	1	180
60	63	12	15	610	4,3	$4 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	1,12	160
70	73,5	14	16	650	7,7	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$	1,33	140
80	84	16	18	700	12,9	$3,8 \cdot 10^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-1}$	1,54	120
90	94,5	18	20	750	19,6	0,9	1,6	1,77	105

характеризуется ее средним квадратическим значением. Для его нахождения из уравнений гидродинамики для плотности  $\rho$ , давления  $p$  и скорости  $v$  (см., например, [125, 135, 136]) следует получить выражение для возмущения давления с учетом членов второго порядка малости и проинтегрировать полученное дифференциальное уравнение в частных производных. Впервые задача о генерации АГВ интенсивными циклонами решена, по видимому, авторами [126, 127]. Они показали, что генерация АГВ осуществляется в основном двумерно-изотропной турбулентностью, причем излучение квадрупольной составляющей преобладает над излучением дипольной составляющей. В работе [130] получено выражение для среднего квадратического значения амплитуды давления:

$$\delta p_m(R) = \frac{C_0^{1/2} k_v \rho_0 h \varepsilon^{19/12}}{8\sqrt{2}\pi v_0^{3/4}} \frac{R_0}{R} \left(\frac{V_0}{l}\right)^{1/3} I^{1/2},$$

$$\varepsilon_t = \frac{\tilde{v}^3}{l},$$

где  $C_0 \approx 2$  – универсальная постоянная,  $h$  – толщина ТЦ,  $R$  – расстояние от центра ТЦ,  $\rho_0$  – невозмущенная плотность воздуха у поверхности воды,  $v_0 \approx 1,4 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с – коэффи-

циент кинематической вязкости воздуха,  $\omega_B \approx 1,7 \cdot 10^{-2}$  с<sup>-1</sup>,  $\tilde{v}$  – флуктуации полной скорости  $V_0$  на расстоянии  $r_0$ , обусловленные турбулентностью (обычно  $\tilde{v}$  на порядок меньше  $V_0$ ),  $k_v = r_r / R_0$ ,  $R_0$  – внешний радиус ТЦ,  $r_r$  – радиус ядра ТЦ, эффективно излучающего АГВ,  $l \approx R_0$  – внешний масштаб турбулентности,  $\varepsilon_t$  – удельная мощность турбулентности,  $I$  – интеграл следующего вида:

$$I = \int_{x_1}^{x_2} \left( \frac{\alpha_0 - x^2}{1 - x^2} \right)^{2/3} \frac{dx}{1 - x^2 x^{7/3}}.$$

Здесь  $x_1 = \Omega_1 / \omega_B$ ,  $x_2 = \Omega_2 / \omega_B$ ,  $\Omega_1$ , и  $\Omega_2$  – минимальные и максимальные частоты в спектре излучения ВГВ. Оказалось, что интенсивность излучения резко увеличивается в окрестности частот  $\Omega_1$  и  $\Omega_2 \approx \omega_B$ , где  $\Omega_1$ , и  $\Omega_2$  – минимальные и максимальные частоты в спектре излучения. Частоты  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  принадлежат диапазону ВГВ. Частота  $\Omega_1$  определяется из условия  $\Omega_1 t_0 \gg 1$ , где  $t_0 = l / V_0$  – характерное время [126, 127]. При этом  $\Omega_1 \approx 10V_0 / l$ . Важно, что  $\Omega_1 / \Omega_2 \approx (1,7 \div 3,4) \cdot 10^{-2} \ll 1$ .

Хотя эффективность излучения квадруполья при  $\Omega \rightarrow \omega_B$  резко увеличивается, одновременно с этим сильно увеличивается и за-

тухание ВГВ. Поэтому практический интерес представляет лишь излучение волн в окрестности частоты  $\Omega_1$ .

Результаты оценок  $\delta p_m$ ,  $\Pi_r$  и  $P_r$  приведены в табл. 4. Видно, что вариации давления в ВГВ от ТЦ начинают превышать уровень атмосферных шумов (около  $0,5 \div 0,7$  Па [126, 129]) при  $v_0 \geq 35 - 40$  м/с, т.е. когда тропический шторм превращается в ураган.

Собственной частоте  $\omega_B$  соответствует период ВГВ около 6 мин. Как уже отмечалось, волны с таким периодом сильно затухают. Поэтому на достаточно больших расстояниях от циклона должны обнаруживаться волны с частотой близкой к  $\Omega_1$ . Ей соответствует период  $T_{r1} \approx 2\pi l / 10V_0 \approx 0,6l / V_0 \approx 0,6R_0 / V_0$ . Например, при  $\tilde{v} = 6$  м/с и  $l = 500$  км имеем  $T_{r1} \approx 5,2 \cdot 10^3$  с  $\approx 1,45$  ч. Этот период очень близок к наблюдаемому авторами [132], где он в среднем составлял 1,5 ч.

*Излучение инфразвука океаническими волнами.* Существует еще один канал эффективного воздействия подсистемы океан – циклон на верхнюю атмосферу. Дело в том, что ТЦ сопровождается интенсивными океаническими волнами. Высота волн обычно достигает 13 – 14 м [137]. Волны, в свою очередь, являются источником шумоподобного акустического излучения. Максимум интенсивности излучения приходится на частоту  $f_m$ ,

которая связана со скоростью ветра в циклоне [138]:

$$f_m = \frac{2\sqrt{2} g}{6\pi V}.$$

Этой частоте соответствует период  $T_{max} = f_m^{-1}$ . Плотность потока энергии акустического излучения вычислена в работе [138]:

$$\Pi_a = \frac{27\pi \rho M^2 g^2}{32 c_{s0}^3} \left( \frac{V}{2g} \right)^8 \cos\theta,$$

где  $M = 3,05 \text{ м}^2/\text{с}^5$ ,  $\theta$  – угол между волновым вектором и нормалью к поверхности океана.

Результаты расчета параметров акустического излучения, таких как  $\Pi_{a0} = \Pi_a(\theta = 0)$ , амплитуда колебаний давления  $\delta p_a = (\rho_0 v_{s0} \Pi_{a0})^{1/2}$ , амплитуда скорости частиц в волне  $\delta v_a = \delta p_a / \rho_a c_{s0}$ ,  $f_m$ ,  $T_{max}$  и мощность инфразвукового излучения  $P_a$  приведены в табл. 5. Здесь  $f_m$  и  $T_{max}$  – частота и период максимума интенсивности излучения,  $\Pi_{a0}$  – плотность потока энергии,  $\delta p_a$  – амплитуда колебаний давления в волне на уровне моря,  $v_w$  – амплитуда скорости частиц в волне на уровне моря,  $S_a$  – эффективная площадь акустического излучателя,  $P_a$  – мощность акустического излучения. Поскольку  $\Pi_{a0} \propto V^8$ , основной вклад в мощность излучения дает ядро циклона, где  $V$  близко к  $V_0(r_0)$ . Радиус этого ядра принимался равным  $r_a = 1,5r_0$ . Радиусу  $r_a$  соответствует площадь  $S_a = \pi r_a^2$ .

Таблица 5. Основные параметры акустического (инфразвукового) излучения, генерируемого океаническим волнением.

$V_0$ , м/с	$f_m$ , мГц	$T_m$ , с	$\Pi_{a0}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\delta p_a$ , Па	$v_w$ , м/с	$S_a \cdot 10^{-9}$ , м <sup>2</sup>	$P_a$ , Вт
10	147	6,8	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	0,7	$2,6 \cdot 10^2$
15	98	10,2	$9,2 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,7	$6,5 \cdot 10^3$
20	74	13,6	$9,2 \cdot 10^{-5}$	0,2	$4,5 \cdot 10^{-4}$	0,7	$6,5 \cdot 10^4$
25	59	17	$5,5 \cdot 10^{-4}$	0,5	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,85	$4,7 \cdot 10^5$
30	49	20,4	$2,4 \cdot 10^{-3}$	1	$2,3 \cdot 10^{-3}$	0,85	$2 \cdot 10^6$
35	42	23,8	$8,1 \cdot 10^{-3}$	1,9	$4,3 \cdot 10^{-3}$	1	$8,1 \cdot 10^6$
40	37	27,2	$2,4 \cdot 10^{-2}$	3,3	$7,5 \cdot 10^{-3}$	1,2	$2,9 \cdot 10^7$
50	29	34	0,14	7,9	$1,8 \cdot 10^{-2}$	1,4	$2 \cdot 10^8$
60	25	40,8	0,6	16,3	$3,7 \cdot 10^{-2}$	1,6	$9,6 \cdot 10^8$
70	21	47,6	2,1	30,4	$6,9 \cdot 10^{-2}$	1,8	$3,8 \cdot 10^9$
80	18	54,4	6	51,4	0,12	2,3	$1,4 \cdot 10^{10}$
90	16	61,2	15,5	82,7	0,19	2,8	$4,3 \cdot 10^{10}$

Воздействие тропического циклона на верхнюю атмосферу. В работе [130] рассмотрен нагрев верхней атмосферы ВГВ. Выше продемонстрировано, что ТЦ является источником интенсивных ВГВ. Последние, распространяясь вверх, взаимодействуют со слоями верхней атмосферы, нагревая их. Эффективная передача энергии от ВГВ к нейтральной атмосфере начинается на высотах  $z_0$ , где скорость частиц в волне  $v_w$  начинает превышать примерно  $0,1 c_{s0}$  [134]. Чем выше интенсивность ВГВ, тем меньше высота  $z_0$  (см. табл. 4). Важно, что

$$v_w(z) = v_w(0) \exp \zeta, \quad \zeta = \frac{1}{2} \int_0^z \frac{dz}{H(z)}.$$

Результаты оценок  $v_w(0)$ , т.е.  $v_w$  у поверхности воды, приведены в табл. 5.

Инфразвук, генерируемый как океаническими волнами, так и турбулентностью циклона, достигая верхней атмосферы, диссипирует, что приводит к нагреву атмосферы в широком диапазоне высот. Диссипация инфразвука начинается на высоте  $z_{a1}$ , где  $v_w \approx 0,1 c_{s0}$ , а заканчивается на высоте  $z_{a2}$ , где длина свободного пробега молекул газа  $l_n \approx \lambda_m = c_{s0} T_{max}$  [134]. Длина волны акустического излучения  $\lambda_m \approx 2 - 30$  км. При этом  $z_{a2} \approx 330 - 430$  км соответственно. Значение  $z_{a1}$  существенно зависит от величины  $V_0$ : при  $V_0(r_0) \approx 20 - 90$  м/с высота  $z_{a1} \approx 300 - 60$  км соответственно.

При  $S_a \ll S_0$  эффективность нагрева в ядре циклона невысокая. Здесь имеют место большие изменения давления  $\delta p_a$  и скорости частиц в волне  $v_w$ . Однако, при  $v_w \geq 0,1 c_{s0}$  профиль волны начинает заметно отличаться от косинусоидального, возникает обогащение частотного спектра высокими частотами. Инфразвук с более высокими частотами поглощается на меньших высотах, где плотность и масса газа выше. Это приводит к существенному ослаблению волны, но незначительному нагреву газа. Поэтому более сильное возмущение верхней атмосферы имеет место не над

ядром сильного циклона (урагана или тайфуна), а ближе к его периферии, где  $V$  меньше  $V_0$  в несколько раз. И хотя здесь меньше значение  $\Pi_a$ , но здесь зато существенно меньше значение интегрального коэффициента поглощения энергии волны, которое входит в экспоненту. Кроме того, при этом  $S_a$  соизмеримо с  $S_0$ . Все это приводит к увеличению температуры воздуха над некоторой средней частью ТЦ, где  $r \approx 10 \div 15 r_0$ .

Нагрев нейтрального газа акустическим излучением вызывает комплекс уже упомянутых вторичных процессов, подобных тем, что вызываются диссипацией ВГВ в верхней атмосфере.

Рассмотрим геомагнитный эффект ВГВ. ВГВ, распространяясь в атмосфере, оказывают на нее двойное воздействие. Линейные волны (что имеет место при  $z < z_0$ ) лишь модулируют параметры нейтрального газа и плазмы. При  $z > z_0$  к этому добавляется нелинейная диссипация волны, в результате чего нейтральная среда нагревается. Более того, ее температура оказывается промодулированной колебанием с удвоенной (в первом приближении) частотой. Добавочный нагрев и модуляция температуры вызывают в свою очередь изменение и модуляцию зависящих от температуры параметров газа: частот соударений, скоростей химических реакций, концентрации электронов и ионов и др. В результате этого возникает возмущение и модуляция как тензора проводимости плазмы, так и тока увлечения заряженных частиц нейтральными частицами. При изменении температуры газа на  $10 \div 100$  %, на десятки процентов также возмущаются компоненты тензора проводимости ионосферы и интегральный ток в ионосфере. Считая, что переходный процесс нагрева газа закончился, для оценки амплитуды колебаний индукции геомагнитного поля на частоте  $2\Omega$  имеем следующее соотношение:

$$\Delta B_{\Omega} \approx \frac{g_m}{2\Omega \tau_T} \mu_0 I_0, \quad (11)$$

где  $\vartheta_m$  – относительное увеличение температуры воздуха,  $\tau_T$  – время релаксации температуры воздуха,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $I_0$  – невозмущенное значение интегрального тока. Полагая в дневное время  $I_0 = 0,2$  А/м,  $\Omega = 10^{-3}$  с $^{-1}$ ,  $\tau_T = 10^4$  с, для  $\vartheta_m = 0,1 \div 1$  получаем  $\Delta B_\Omega \approx 1,3 \div 13$  нТ. Близкое значение  $\Delta B_\Omega$  наблюдалось, например, в работе [128, 129], где приведены также более подробные расчеты в линейном приближении геомагнитного эффекта, вызываемого прохождением ВГВ.

В ночное время  $I_0$  на порядок меньше, а значит на порядок меньше и вариация  $\Delta B_\Omega$ .

Заметим, что соотношение (11) применимо для приближенного описания магнитного эффекта тока, протекающего по бесконечному горизонтальному листу. Не учитывается также экранирующее действие подстилающей поверхности.

Опишем далее геомагнитный эффект акустических волн. По своим физическим механизмам воздействие инфразвука на верхнюю атмосферу подобно воздействию ВГВ. Подобна и реакция верхней атмосферы на это воздействие. Различие состоит в величине преобладающих периодов вариаций индукции геомагнитного поля. Воздействие инфразвука должно привести к увеличению уровня геомагнитных пульсаций в диапазоне периодов от единиц до десятков секунд (см. табл. 5). Эффект заметно выражен лишь на основной частоте инфразвука ( $\Omega \approx 0,1 \div 1$  с $^{-1}$ ), где  $\Delta B \sim 0,1 \div 1$  нТ (в дневное время). На удвоенной частоте  $\Delta B_\Omega$  на 2 – 3 порядка меньше, чем на частоте  $\Omega$  (см. формулу (11)).

Рассмотрим далее генерацию электромагнитного излучения ТЦ и его воздействие на магнитосферу и радиационный пояс. Развитие ТЦ сопровождается интенсивными грозами, а значит и генерацией электромагнитного излучения в широком диапазоне частот ( $f \leq 100$  кГц). Об этом свидетельствуют, в частности, ракетные и спутниковые наблюдения (см., например, [139 – 142]).

Энергия и мощность сильнейшей молнии порядка 10 ГДж и 10 ГВт. За время существования ТЦ их число может достичь  $10^3 \div 10^4$ . Суммарная энергия и мощность может приблизиться к  $10^2$  ТДж и  $10^2$  ТВт. В энергию акустических и электромагнитных волн преобразуются около  $10^{-3}$  и  $10^{-4} \div 10^{-3}$  энергии молнии соответственно. Тогда энергия этих волн, генерируемых  $10^4$  молниями, составит около 100 и  $10 \div 100$  ГДж соответственно. Средняя мощность этих излучений за время существования циклона (6 суток) приближается к 200 и  $20 \div 200$  кВт соответственно.

Потоки акустической и электромагнитной энергии, достигая верхней атмосферы, существенно изменяют ее параметры. Кроме того, электромагнитное ОНЧ-излучение вдоль магнитных силовых линий поступает в магнитосферу, заполненную энергичными частицами (электронами и протонами). В результате возбуждения циклотронной неустойчивости возникает стимулированное высыпание заряженных частиц из геомагнитной ловушки в верхнюю атмосферу [37]. Динамические уравнения, описывающие вариации плотности энергии ОНЧ-излучения либо излучения альвеновских волн и числа энергичных частиц в магнитной силовой трубке, содержащей источник волн, аналогичны (7), (8) [11, 37].

Вызванное излучением ОНЧ- либо альвеновских волн высыпание соответственно электронов или протонов производит дополнительную ионизацию в верхней атмосфере, модулирует токовую струю, которая, в свою очередь, является источником низкочастотных излучений. Развиваются вторичные процессы в подсистемах, которые уже упоминались. Таким образом осуществляется воздействие циклонов на магнитосферу и радиационный пояс, а также обратное воздействие последних на нижележащие области околоземной среды.

Опишем механизм генерации квазистационарного электрического поля и его воз-

действие на магнитосферу и радиационный пояс. Ключевая роль в генерации квазистационарного электрического поля принадлежит океаническим аэрозолям. Под аэрозолями понимают твердые и жидкие частицы с диаметрами  $d_a$  от 0,05 до 50 мкм [142 – 146]. Существует несколько механизмов их образования. Самые крупные аэрозоли ( $d_a > 1$  мкм) возникают в результате разбрызгивания и высыхания капель при скорости ветра  $V > 7$  м/с, а также в результате распада струйки воды, выбрасываемой из лопающегося пузырька. В спокойных условиях их концентрация  $n_a$  и объемная плотность  $\rho_a$  не превышают  $5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-3}$  и  $5 \cdot 10^{-11} \text{ кг/м}^3$ . Более мелкие ( $d_a < 1$  мкм) аэрозоли образуются, в основном, в момент разрыва пленки всплывающего на поверхность пузырька газа, в котором имеется избыточное давление. Другим способом образования аэрозолей с указанными размерами является стягивание лопнувшей пленки пузырька. Максимум функции распределения частиц по размерам приходится на  $d_a \approx 0,1$  мкм. В спокойных условиях для этих частиц  $n_a \approx (3 \div 5) \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ ,  $\rho_a \approx (3 \div 5) \cdot 10^{-10} \text{ кг/м}^3$  [142]. Поэтому именно аэрозоли с  $d_a \approx 0,1$  мкм играют главную роль в обсуждаемых ниже эффектах.

Сильный ветер в циклоне способствует более интенсивному образованию аэрозолей. Для плотности аэрозолей всех масштабов справедливо следующее эмпирическое соотношение [142]:

$$\ln \rho_a = 0,16V + 1,45 \quad (12)$$

или

$$\rho_a V = \rho_{a0} e^{\alpha_a V},$$

где  $\rho_{a0} = 4,3 \cdot 10^{-9} \text{ кг/м}^3$ ,  $\alpha_a = 0,16 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}$ . Пределы применимости формулы (12) неизвестны, но уже при  $V = 35$  м/с (переход к урагану)  $\rho_a \approx 10^{-6} \text{ кг/м}^3$  и  $n_a \approx 10^{11} \text{ м}^{-3}$ .

В спокойных условиях средняя плотность тока в атмосфере  $j_0 \approx 3 \cdot 10^{-12} \text{ А/м}^2$ . Уравнения баланса концентраций положительных и отрицательных ионов аналогичны и имеют вид:

$$\frac{dn_i}{dt} = q_i - \alpha_i n_i^2 - \beta_a n_a n_i,$$

где  $q_i$  – скорость образования ионов,  $\alpha_i = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$  – коэффициент рекомбинации ионов,  $\beta_a = 1,65 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$  – коэффициент прилипания ионов к аэрозолям. В отсутствие последних, в стационарном состоянии  $n_{i\infty} = (q_i/\alpha_i)^{1/2}$ . В спокойных условиях при  $q_{i0} \approx 10^7 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$  имеем  $n_{i\infty} \approx 2,5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ . При  $n_a \neq 0$  практически все имеющиеся ионы быстро (за время  $\tau_a = (\beta_a n_a)^{-1} \sim 10^{-7} \text{ с}$ ) прилипли к аэрозолям. Заряд в единице объема  $Q_0 = en_{i\infty}$  составит около  $4 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^3$ . При скорости конвекции  $w$  разделившиеся заряды создали бы плотность атмосферного тока  $j_{a0} = Q_0 w = en_{i\infty} w$ . Для  $n_{i\infty} = 2,5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$  и  $w = 0,6 \text{ м/с}$  имеем  $j_{a0} = 2,4 \cdot 10^{-10} \text{ А/м}^2$ . В спокойных условиях, однако, значительного разделения заряда не происходит и  $j_{a0} \approx j_0 \approx 3 \cdot 10^{-12} \text{ А/м}^2$ .

В развитии циклоне ситуация может резко измениться. При этом существенно активизируются образование аэрозолей, их электризация, разделение зарядов и т. д.

Механизмы электризации аэрозолей перечислены в [146]. Для ТЦ основным из них, по-видимому, является распыление капель. Восходящие потоки воздуха в циклоне переносят вверх положительно заряженные аэрозоли. Более крупные капли, заряженные отрицательно, двигаются вниз. В результате этого существенно возрастает плотность атмосферного тока. Увеличение интенсивности осадков приводит к значительному росту  $j_a$ . Во время ливней, обычно сопровождающих ТЦ,  $j_a$  может достигнуть  $10^{-8} - 10^{-7} \text{ А/м}^2$  [142].

Преобладание концентрации ионов одного знака над другим обеспечивает возникновение нескомпенсированного объемного заряда (обычно положительного). Его величина существенно может превысить фоновое значение ( $\sim 10^{-10} \text{ Кл/м}^3$ ). В грозовом очаге, который возникает в кучево-дождевом облаке ядра циклона, плотность тока уже приближается к  $j_a \approx 10^{-7} \text{ А/м}^2$ . При том же значении  $w$  это соответствует  $Q = j_a / w \approx 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}^3$  и

скорости разделения заряда  $\dot{Q} = j_a / H_a \approx 10^{-11} \text{ А/м}^3$ . (Точка над  $Q$  обозначает производную по времени). Здесь  $H_a$  – толщина облака, обычно  $H_a \approx 10 \text{ км}$ . Эти значения следует рассматривать как оценку сверху. Более вероятными представляются значения  $j_a \approx 3 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-8} \text{ А/м}^2$  и  $\dot{Q} \approx 3 \cdot 10^{-13} - 3 \cdot 10^{-12} \text{ А/м}^3$ . Важно, что даже в этом случае  $j_a/j_0 \approx 10^3 \div 10^4$ .

Появление мощного атмосферного тока приводит к генерации квазистационарного поля в верхней атмосфере, ионосфере и магнитосфере [131, 132].

Процессы в атмосфере, имеющие характерное время становления не менее  $t_0 = \varepsilon_0/\sigma_0 \approx 440 \text{ с}$ , можно рассматривать как квазистационарные. Здесь  $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – электрическая постоянная,  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^{-14} \text{ См/м}$  – проводимость воздуха у поверхности воды в невозмущенных условиях. Следуя работам [131, 132], для оценки электрического поля в ионосфере, вызванного циклонической деятельностью, можно получить следующее соотношение:

$$E_i = E_0 \frac{\sigma_0 j_a}{\sigma_i j_0},$$

где  $\sigma_i \approx 10^{-6} \text{ См/м}$  – проводимость плазмы у нижней границы ионосферы,  $E_0 = 150 \text{ В/м}$  – напряженность электрического поля у поверхности воды. Подставляя оцененные выше значения  $j_a$ , получим  $E_i \approx 3 \div 30 \text{ мВ/м}$ . Эта величина  $E_i$  на 1 ÷ 2 порядка превышает фоновые значения напряженности электриче-

ского поля в ионосфере. Добавим, что максимальное возмущение этого поля имеет место не строго над ТЦ, а несколько в стороне от него. Смещение связано с переносом возмущения по магнитным силовым линиям с высоты динамо-области ( $z \approx 100 \div 150 \text{ км}$ ) на большие высоты. Величина смещения достигает  $600 \div 800 \text{ км}$  [131, 132], что одного порядка с размером ТЦ.

Увеличение атмосферного тока в области циклона вызывает также вариации геомагнитного поля. Оценить изменение индукции магнитного поля  $\Delta B$  на расстоянии  $R$  можно из известного соотношения:

$$\Delta B = \mu_0 \frac{I_a}{2\pi R}.$$

Здесь  $I_a = j_a S_0$ , где  $S_0 = \pi R_0^2$ . Тогда на расстоянии  $R_0$  от центра циклона для оценок в системе СИ имеем следующее выражение

$$\Delta B(R_0) \approx 6,3 \cdot 10^{-7} j_a R_0.$$

Например, при  $j_a \approx 3 \cdot 10^{-9} \text{ А/м}^2$ ,  $R_0 = 600 \text{ км}$  получим  $\Delta B(R_0) \approx 1 \text{ нТл}$ . Результаты оценок  $\Delta B(R_0)$  приведены в табл. 6. Здесь  $E_e$  – напряженность электрического поля в облаке,  $F_e$ ,  $F_p$ ,  $F_k$  и  $F_c$  – удельные электрическая, термодинамическая, кориолисова и центробежные силы, причем  $F_e = QE_e$ ,  $F_p = \Delta p(r_0)/r_0$ ,  $F_k = 2\omega_e v_0 \rho$ ,  $F_c = \rho v_0^2/2$ ,  $\omega_e$  – вертикальная составляющая скорости ТЦ на расстоянии  $r_0$  от его центра,  $j_a$  – плотность атмосферного тока,  $\dot{Q}$  – скорость изменения объемного заряда в ТЦ,  $\omega_e$  – угловая скорость вращения Земли.

Таблица 6. Электрические параметры ТЦ в зависимости от плотности электрического заряда.

$Q$ , Кл/м <sup>3</sup>	$10^{-10}$	$10^{-9}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$
$w_0$ , м/с	$3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	0,1	0,2	0,3	0,5
$j_a$ , А/м <sup>2</sup>	$3 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$
$\dot{Q}$ , А/м <sup>3</sup>	$3 \cdot 10^{-16}$	$4 \cdot 10^{-15}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-8}$
$E_e$ , В/м	$10^5$	$2 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	$10^6$	$2 \cdot 10^6$
$F_e$ , Н/м <sup>3</sup>	$10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-2}$	0,8	10	$2 \cdot 10^2$
$F_p$ , Н/м <sup>3</sup>	0,1	0,3	0,6	0,8	1,1	1,2	1,4
$F_k$ , Н/м <sup>3</sup>	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
$F_c$ , Н/м <sup>3</sup>	$3 \cdot 10^{-2}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5
$v_0$ , м/с	15	30	50	60	70	80	90
$r_0$ , км	10	11	14	15	16	18	20
$\Delta p(r_0)$ , кПа	0,8	3	9	12	17	22	28

$R_0$ , км	400	450	570	610	650	700	750
$\Delta B(R_0)$ , нТл	$8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	0,2	3,8	82	$1,3 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^4$

Генерируемое электрическое поле, незначительно ослабляясь, по магнитным силовым линиям проникает в магнитосферу и при определенных условиях уменьшает «поперечную» энергию заряженных частиц на величину  $\varepsilon_{\perp} = eE_{\perp}L_{\perp}$ , где  $L_{\perp}$  – горизонтальный масштаб возмущения электрического поля [11, 13, 19]. Полагая  $L_{\perp} = 2R_0 \approx 1000$  км, получим  $\varepsilon_{\perp} \approx 5 \div 50$  кэВ. Таких значений  $\varepsilon_{\perp}$  достаточно для перераспределения частиц по питч-углам и высыпания определенной их доли из радиационного пояса в верхнюю атмосферу, а также для возникновения ряда уже упоминавшихся вторичных процессов.

*Основные результаты.* Взаимодействие океана и ТЦ изучалось давно и детально (см., например, [147 – 149]). Работа [133] интересна тем, что в ней рассмотрено нелинейное взаимодействие в подсистеме океан – ТЦ и показано, что процесс может описываться затухающими нелинейными колебаниями. При этом ТЦ считался неподвижным, что бывает весьма редко. В работе [130] учтено и движение ТЦ. Кроме того, сделано естественное предположение, что энергетическая подпитка возникшего циклона имеет место до тех пор, пока температура поверхностного слоя  $t_1$  превышает температуру нижележащих холодных слоев  $t_{1m}$ . В работе [133] считалось, что подпитка имеет место лишь при  $t_1 > t_c$ . Поскольку  $t_c \approx 26,5^{\circ}\text{C}$ , а  $t_{1m} \approx 23^{\circ}\text{C}$ , то разница существенна. В частности, в нашем случае, стационарное значение  $t_s < t_c$ . Кроме того, стационарное значение тангенциальной скорости в циклоне может достигать  $50 \div 60$  м/с (в [133] оно было около 20 м/с). Значение  $v_0 \approx 20$  м/с для урагана – слишком малó.

Выше, как и в работе [130], рассмотрены три механизма воздействия ТЦ на верхнюю атмосферу и геокосмос: акустико-гравитационный, электромагнитный и квазистатический. Вычислены потоки энергии

АГВ. Показано, что даже для наиболее сильных ТЦ мощность излучаемых ВГВ  $P_r$  значительно (на два порядка) меньше мощности  $P_f$ , затрачиваемой на трение потоков воздуха в циклоне о поверхность океана. Учитывая, что  $P_f \propto v_0^3$ , а  $P_r$  пропорциональна  $v_0^{53/12}$  (т. е. растет быстрее с ростом  $v_0$ ), приходим к выводу, что генерация ВГВ могла бы ограничивать дальнейший рост скорости ветра в циклоне и его предельную мощность, связанную с движением воздушных масс. Это имело бы место, однако, при нереально больших значениях  $v_0$ .

Мощность излучения ВГВ для сильнейшего ТЦ достигает  $10^{11} - 10^{12}$  Вт. Для сравнения укажем, что по нашим оценкам мощность излучения ВГВ горными системами планеты (мощность орографических возмущений) составляет в среднем около  $10^{11}$  Вт.

Интересным выводом работы [130] является возможность генерации возмущений геомагнитного поля не только на частоте ВГВ (что естественно), но и на удвоенной частоте в результате нагрева газа диссипируемой на высотах 80 – 200 км ВГВ. Важно, что этот вывод подкрепляется результатами наблюдений [128, 129]. В этой работе возмущения давления имели составляющую с периодом  $T$  около 2 и 1 ч, а возмущение  $D$  – компоненты геомагнитного поля – составляющие с периодами 1 и 0,5 ч. Оценим время запаздывания вариаций геомагнитного поля на удвоенной частоте по сравнению с изменениями давления воздуха на поверхности. Если предположить, что ВГВ с  $T \approx 1$  ч достигает верхней атмосферы со скоростью, близкой к  $0,2c_{s0}$  [128, 129], то время ее распространения до высоты  $z \approx 120$  км составляет около 30 минут. Запаздывание вариаций температуры, связанных с нагревом газа в верхней атмосфере, как показано выше, составляет  $T_w/4 \approx 25 \div 30$  мин. Суммарное запаздывание должно быть

около  $55 \div 60$  мин. Наконец, в [130] объяснен результат из [128, 129], где отмечалось, что наиболее вероятное значение периода ВГВ составляло 1,5 ч. Выше показано, что интенсивность излучения резко увеличивается в окрестности частоты  $\Omega_1$ , которой соответствует период  $T_{r1} \approx 1,45$  ч (при турбулентных пульсациях скорости  $\tilde{v} \approx 6$  м/с и радиусе вихря  $l \approx 500$  км). Добавим, что авторами [128, 129] наблюдалась генерация АГВ не ТЦ, а мощным атмосферным фронтом. Разница состоит в механизмах образования атмосферных вихрей, механизмы же генерации АГВ остаются подобными, в обоих случаях они вызваны интенсификацией атмосферной турбулентности.

На высотах  $100 \div 150$  км ВГВ становятся нелинейными, здесь скорость  $v_w$  сопоставима со скоростью звука. Имеет место диссипация энергии этих волн, что способствует возникновению целого комплекса динамических и тепловых эффектов. К ним относятся: всплывание нагретого воздуха, развитие гидродинамической неустойчивости в атмосфере, интенсификация турбулентности, возбуждение струйного течения [150] и диссипативных структур [151], неустойчивость АГВ, стимулированная значительным увеличением электрического поля на ионосферных высотах [152], генерация АГВ-вихрей [53] и др.

Возникновение электромагнитного излучения ТЦ обусловлено грозовой деятельностью в ядре циклона. Генерируемое при этом ОНЧ-излучение эффективно взаимодействует с запасенными в радиационном поясе электронами. Возникающие при этом процессы детально изучены в работе [37]. Оценки триггерного эффекта выполнены автором [10 – 13, 19].

Механизм генерации квазистационарных возмущений электрического поля и результаты соответствующих наблюдений обсуждаются в [131, 132]. В цитируемых работах однако, не указываются причины увеличения тока в приводной атмосфере. По-

видимому, его рост обусловлен активизацией процесса образования и электризации аэрозолей в результате значительного усиления ветра в развившемся циклоне.

Добавим, что до последнего времени роль крупномасштабной термодинамической неустойчивости и электрических процессов в ТЦ недооценивалась. На необходимость учета последних обращено внимание в [130]. Расчеты показали, что электрические силы могут быть не только существенными, но и определяющими (табл. 7) [130]. Последняя ситуация может возникнуть в циклоне лишь тогда, когда  $Q \geq 10^{-6}$  Кл/м<sup>3</sup>,  $j_a \geq 10^{-7}$  А/м<sup>2</sup>. В этом случае и воздействие ТЦ на ионосферу и магнитосферу тоже должно увеличиться, так как  $j_a / j_{a0} \geq 10^5$ . При достаточно большой объемной плотности заряда  $Q$  воздух в ТЦ ведет себя как плазмopodobная среда, помещенная во внешнее магнитное поле. В такой среде следует ожидать появление вихрей электромагнитной природы, волновых низкочастотных процессов, электрических структур, неустойчивостей и т.д. В результате развития таких процессов возникают новые каналы воздействия циклона на ионосферу и магнитосферу. Эти вопросы, однако, требуют специального рассмотрения.

## 6.6 Солнечный терминатор (СТ)

Теории СТ посвящена книга [86] и целый ряд работ (см., например, [153 – 160]).

Прохождение линии раздела день – ночь приводит к изменению температуры атмосферы на десятки кельвинов на высотах более 130 км, а при  $z > 200$  км – на сотни кельвинов. При этом существенно изменяется тепловая энергия атмосферы, нарушается скорость химических реакций, возникает градиент давления и генерируются АГВ. Характерная длительность  $\Delta t$  действия СТ порядка 1 – 10 мин. Например, на границе термосферы ( $z \approx 130$  км) при  $\Delta T = 10$  К и объеме возмущенной атмосферы  $V_T$  имеем [34]:

$$\Delta E_T = c_p \rho V_T \Delta T = 2\pi c_p \rho R_E H v_{ST} \Delta T \Delta T,$$



где  $v_{ST} \approx 500$  м/с – скорость солнечного терминатора,  $H \approx 10$  км – приведенная высота атмосферы,  $R_E \approx 6400$  км – радиус Земли. При  $\rho \approx 10^{-7}$  кг/м<sup>3</sup>,  $\Delta t \approx 500$  с имеем  $\Delta E_T \approx 10^{14}$  Дж,  $P_T = 2 \cdot 10^{11}$  Вт. Плотности потока энергии

$\Pi = c_p \rho v_{ST} \Delta T$  и поток энергии  $\Pi_E = \Pi \Delta t$  в горизонтальном направлении составляют около 0,5 Вт/м<sup>2</sup> и 250 Дж/м<sup>2</sup>. Объемная плотность кинетической энергии газа, движущегося впереди фронта СТ (во фронте ударной Таблица 7. Характеристики магнитной бури (ориентировочные значения). При  $K < 3$  имеют место незначительные флуктуации, а при  $K \geq 3$  – буря.

$K$ индекс	$\Delta B$ , нТл	$\Delta t$ , ч	$\Delta E_M$ , Дж	$P_M$ , Вт	Качественная характеристика возмущения/бури
0	< 3	1	$(1 - 1.5) \times 10^{14}$	$(2.8 - 4.2) \times 10^{10}$	Крайне слабое возмущение
1	3 - 5	1 - 2	$(1.5 - 2.5) \times 10^{14}$	$(2.1 - 7) \times 10^{10}$	Сверхслабое возмущение
2	5 - 10	1 - 2	$(2.5 - 5) \times 10^{14}$	$(3.5 - 14) \times 10^{10}$	Очень слабое возмущение
3	10 - 20	1 - 2	$(0.5 - 1) \times 10^{15}$	$(0.7 - 2.8) \times 10^{11}$	Слабая буря
4	20 - 40	1 - 2	$(1 - 2) \times 10^{15}$	$(1.4 - 5.6) \times 10^{11}$	Весьма умеренная буря
5	40 - 70	2 - 3	$(2 - 5) \times 10^{15}$	$(1.9 - 4.9) \times 10^{11}$	Умеренная буря
6	70 - 120	3 - 4	$(3.5 - 6) \times 10^{15}$	$(2.5 - 5.6) \times 10^{11}$	Сильная буря
7	120 - 200	4 - 5	$(0.6 - 1) \times 10^{16}$	$(3.4 - 7.7) \times 10^{11}$	Очень сильная буря
8	200 - 330	5 - 10	$(1 - 1.7) \times 10^{16}$	$(2.8 - 9.5) \times 10^{11}$	Сверхсильная буря
9	330 - 500	6 - 12	$(1.7 - 2.5) \times 10^{16}$	$(0.4 - 1.2) \times 10^{12}$	Крайне сильная буря

волны, так как при  $z \leq 150$  км  $v_{ST} > c_s$ ) порядка  $\rho v_{ST}^2 / 2 \approx 10^{-2}$  Дж/м<sup>3</sup>. В энергию АГВ преобразуется, по-видимому, около 0,1% кинетической энергии газа. При этом  $\Pi_a \approx \eta_a \rho v_{ST}^3 / 2 \approx 5 \cdot 10^{-3}$  Вт/м<sup>2</sup>, где  $\eta_a \approx 10^{-3}$  – коэффициент преобразования энергии. Плотность потока энергии в вертикальном направлении  $\sim 10^{-3}$  Вт/м<sup>2</sup>. Эта величина того же порядка, что и при распространении АГВ, порожденных источниками другой природы, а также планетарных и приливных волн (см. табл. 2).

Прохождение СТ сопровождается также значительным изменением ионизации, а значит, и проводимости ионосферы. Последнее приводит к нарушению сложившихся условий взаимодействия между подсистемами, в частности, между ионосферой и магнитосферой. Вариации проводимости плазмы в области токовой струи ( $z \sim 100$  км) обеспечивают, с одной стороны, изменение ионосферного электрического поля поляризации, которое, проникая в магнитосферу, взаимодействует с энергичными частицами, а с другой стороны, генерацию низкочастотных электромагнитных волн, также взаимодействующих

с упомянутыми частицами. Наконец, прохождение СТ способствует перераспределению энергии ОНЧ-волн, запасенной во время грозных разрядов, в волноводе Земля–ионосфера. При этом величина потока ОНЧ-энергии в магнитную силовую трубку изменяется и возмущаются параметры взаимодействия волна-частица в радиационном поясе. Все три фактора приводят к высыпанию энергичных частиц из магнитосферы, к активизации взаимодействия между атмосферой, ионосферой и магнитосферой.

Магнитный эффект СТ описан в работах [161, 162].

Эффектам магнитоспряженного СТ посвящены статьи [158].

Таким образом, СТ является регулярно действующим высокоэнергичным источником, обеспечивающим изменение параметров взаимодействия подсистем в системе ЗАИМ.

### 6.7. Затмение Солнца (ЗС)

Это физическое явление сравнительно редко наблюдается в одной и той же местности. Тем не менее, его роль велика. ЗС дает возможность проследить за динамикой око-

лоземной среды, за взаимодействием подсистем в системе ЗАИМ.

С привлечением оптического, магнитометрического и ряда радиофизических методов нами проведены комплексные исследования динамических процессов в атмосфере и ионосфере в широком диапазоне высот (до 1500 км), сопутствовавших частным (73 %) ЗС 11 августа 1999 г. [164 – 167], 31 мая 2003 г. [168 – 171], 3 октября 2003 г., 29 марта 2006 г., 1 августа 2008 г. и 4 января 2011 г. [172 – 200]. ЗС вызвали целый комплекс процессов на всех высотах и перестройку околоземной среды в целом. Качественно она напоминала перестройку при наступлении ночи, но ее продолжительность не превышала 2 – 4 ч. Сопутствовавшие ЗС процессы имели значительную энергетику, вызвали изменение взаимодействия подсистем системы ЗАИМ, в частности, они были причиной ионосферно-плазмозферного и ионосферно-магнитосферного взаимодействий.

Остановимся несколько подробнее на эффектах ЗС 11 августа 1999 г.

Процессы в приземной атмосфере были связаны с уменьшением солнечной радиации, повлекшим за собой уменьшение температуры воздуха на 7 К, ее градиента – примерно в 4 раза и изменение конвективной активности. Имел место подъем нижней границы слоя с конвективными ячейками на стадии увеличения покрытия диска Солнца и его опускание на стадии уменьшения покрытия. Этот процесс запаздывал по отношению к главной фазе ЗС на  $16 \pm 1$  мин, что соответствовало кинематическому коэффициенту турбулентной диффузии около  $1 \text{ м}^2/\text{с}$ .

В E- и F-областях ионосферы имело место уменьшение концентрации электронов  $N$  на десятки, а в D-области – на 50 – 60 %. Более интересным, однако, являлся рост  $N$  на высотах 81 – 87 км через 100 – 40 мин после начала ЗС, который продолжался не менее 3 – 4 ч. Такое поведение  $N$  обусловлено, по видимому, высыпанием электронов из магни-

тосферы. Предложен механизм стимуляции высыпаний магнитосферных энергичных электронов в атмосферу в течение ЗС и после него [166]. По оценкам, плотность потоков высыпавшихся частиц с энергиями 40 – 80 кэВ достигала  $10^7 - 10^8 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ .

ЗС сопровождалось уменьшением температуры нейтралов, электронов и ионов, изменением скоростей химических реакций, а также вариациями потоков плазмы из плазмозферы в ионосферу (на стадии главной фазы ЗС) и в обратном направлении до ЗС и после него. Соответствующие максимальные потоки составляли  $2,5 \cdot 10^{13}$  и  $2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$  [167].

ЗС часто сопровождается увеличением  $N$  в D- и E-областях, что, скорее всего, вызвано высыпанием высокоэнергичных электронов из радиационного пояса, т. е. взаимодействием подсистем в системе ЗАИМ [166].

Таким образом, ЗС позволили уточнить характер взаимодействия подсистем в системе ЗАИМ.

## 6. 8. Солнечные вспышки (СВ)

СВ способны заметно перестроить взаимодействие подсистем в системе СМСМИАЗ.

Во время СВ больше всего изменяется плотность потока энергии рентгеновского излучения ( $\lambda < 10 \text{ нм}$ ), которая достигает значений  $P_r \approx 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ . Длительность  $\Delta t$  СВ варьируется от 1 до 30 мин. При  $\Delta t \approx 10^3 \text{ с}$  поток энергии рентгеновского излучения составляет около  $1 \text{ Дж/м}^2$ . Под действием рентгеновской вспышки увеличивается скорость ионизации молекул газа на величину порядка  $10^8 - 10^9 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ . При этом электронная концентрация в E-области возрастает на 10 – 100 %, а в D-области ионосферы – на сотни процентов и более [201]. После этого начинаются вторичные процессы, подобные тем, что имеют место при прохождении СТ.

СВ сопровождаются также выбросом высокоэнергичных протонов с энергиями 10 –  $10^2 \text{ МэВ}$ . Протонные вспышки (их частота

составляет около 10 % от всех СВ) приводят к увеличению концентрации электронов в полярной шапке на 1 – 2,5 порядка, резкому усилению поглощения в этой области и перестройке процессов в подсистемах системы СМСМИАЗ.

Потоки электронов с энергиями 1 – 30 кэВ и плотностью  $P_e$  вызывают существенный рост  $N$  соответственно на высотах 140 – 90 км. Высыпаящиеся электроны способны увеличить  $N$  на два – три порядка, а значит и инициировать описанный выше механизм ионосферно-магнитосферного взаимодействия. Эти частицы приводят также к заметному нагреву атмосферы. Температура газа увеличивается на величину 10 и 100 К на высотах 100 и 120 км соответственно. Такие вариации  $\Delta T_a$  вызывают генерацию АГВ, распространяющихся преимущественно из высоких широт к экватору (см., например, [202]).

### 6.9. Геокосмические бури

Нестационарные потоки солнечного ветра, выбросы коронального вещества вызы-

вают самую значительную перестройку процессов в системе СМСМИАЗ (см., например, [24, 25 203 – 235]. Схема основных процессов показана на рис. 2. Оказывается, что около 2/3 от всего числа магнитных бурь порождаются магнитными облаками и областями сжатия на границе разноскоростных потоков. Эти возмущения в солнечном ветре приводят к сильным магнитным бурям ( $\Delta B > 100$  нТл). Для магнитного облака значения плотности потока энергии  $P_p$  могут достигать  $3 \cdot 10^{-4}$  и  $3 \cdot 10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup> для магнитной и кинетической энергий соответственно. Сами энергии составляют  $10^{17}$  и  $10^{20}$  Дж, мощности приближаются к значениям  $3 \cdot 10^{12}$  и  $3 \cdot 10^{14}$  Вт.

Геокосмическая буря, как уже отмечалось, представляет собой синергетически взаимодействующую совокупность магнитной, ионосферной, атмосферной и, вообще говоря, электрической бурь. Их энергетика – велика (табл. 8, см. также [34])

Таблица 8. Энергетические характеристики геокосмической бури

Область геокосмоса	Энергия, Дж	Мощность, Вт	Продолжительность, с	Относительные изменения энергии	Примечание
Магнитосфера	$10^{16}$	$10^{12}$	$10^4$	$10^{-2}$	Энергия магнитного поля
	$10^{10} - 10^{10}$	$10^4 - 10^6$	$10^4 - 10^5$	$10^2 - 10^4$	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

Энергию магнитной бури (МБ) можно оценить по возмущению индукции геомагнитного поля  $B$ . Так как плотность магнитной энергии  $\epsilon_M \sim B^2$ , то

$$\Delta E_M = 2E_{M0} \frac{\Delta B}{B_0},$$

где  $E_{M0} \approx 0,8 \cdot 10^{18}$  Дж – энергия невозмущенного магнитного поля Земли. Поскольку максимальные значения  $\Delta B$  достигают  $0,02B_0$

максимальная энергия МБ не превышает  $3 \cdot 10^{16}$  Дж (табл. 7, табл. 9). Как видно из табл. 7, бурей имеет смысл именовать возмущения магнитного поля с  $\Delta B \geq 20$  нТл ( $K_p \geq 3$ ).

Начало ионосферной бури обязано деформации дневной стороны магнитосферы, которое вызывает интенсивное высыпание

мягких (с энергиями 50 – 200 эВ) электронов из дневных граничных слоев в область каспа. Плотность потока электронов может приближаться к  $3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ . При площади каспа  $10^{12} \text{ м}^2$  и продолжительности высыпаний  $10^4$  с получаем значения мощности  $\sim 10^9$  Вт и энергии  $\sim 10^{13}$  Дж. Высыпающиеся электроны

Таблица 9. Характеристики фаз крайне сильной магнитной бури

Фаза	Начальная	Основная	Восстановительная
$\Delta t$ , ч	1 – 2	6 – 12	24 – 48
$\Delta B$ , нТл	20	500	400
$\Delta E_M$ , Дж	$1,1 \cdot 10^{15}$	$2,7 \cdot 10^{16}$	$2,2 \cdot 10^{16}$
$P_M$ , Вт	$1,5 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^{11} - 1,3 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{11} - 2,5 \cdot 10^{11}$

производят дополнительную ионизацию и нагрев атмосферы в области каспа. На высотах  $z \approx 200 - 300$  км увеличение скорости ионизации  $\Delta q \sim 10^9 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ ,  $N$  увеличивается на сотни процентов, температура газа – на 10 – 100 К. При оценках  $\Delta T_a$  полагалось, что характерное время теплопроводности  $5 \cdot 10^2 - 4 \cdot 10^3$  с для  $z \approx 300 - 200$  км соответственно. При этом активно генерируются сильные (нелинейные) ВГВ и солитоны. Эти волны распространяются в основном в направлении к экватору. Нелинейные ВГВ приобретают пилообразный профиль (см., например, [67, 68, 159]). Нагрев термосферы обуславливает изменение циркуляции и скоростей химических реакций и, в частности, увеличение отношения концентраций O и N<sub>2</sub>. Все это способствует возникновению положительной фазы ионосферных бурь (см., например, [205]).

После того как солнечный ветер достигает хвоста магнитосферы, в нем развивается следующий комплекс процессов: происходит ускорение частиц в граничных слоях хвоста, усиливаются продольные магнитосферные токи и замыкающие их ионосферные токи, возрастает кольцевой ток в ионосфере, который и обуславливает вариации  $\Delta B$  (точнее, так называемые  $D_{st}$  вариации), т. е. собственно МБ, активизируется высыпание авроральных электронов, возрастает  $N$ , усиливается джоулев нагрев плазмы в авроральной ионо-

сфере, возмущаются термосферная циркуляция и скорости химических реакций. За отрицательную ионосферную бурю ответственны подъем ионосферной плазмы, изменения концентраций нейтральных частиц и возбуждение колебательных уровней молекул азота и кислорода, вариации ионосферно-магнитосферного электрического поля и т. д.

За окончанием МБ возникают эффекты последствия, природа которых окончательно не установлена (см., например, [205]). Наиболее яркий из них – среднеширотное высыпание релятивистских электронов, энергия и плотность потока которых достигает значений  $\sim 1$  МэВ и  $10^9 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ . При этом на высотах  $z \geq 40$  км значительно увеличиваются  $\Delta q$  и  $N$ . Например, при  $P_e = 10^9 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$  ( $P_p = 1,6 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$ ) получим  $\Delta q \approx 2 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ ,  $N \approx 10^{10} \text{ м}^{-3}$  на высотах 40 – 60 км. Если высыпание электронов имеет место на площади  $3 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$ , суммарная мощность и энергия этого процесса порядка  $5 \cdot 10^{10}$  Вт и  $5 \cdot 10^{15} - 5 \cdot 10^{16}$  Дж (при продолжительности высыпаний 1 – 10 суток). Их энергетика сопоставима с энергетикой умеренной или сильной МБ (табл. 7).

Многие из описанных эффектов гео-космических бурь наблюдались нами в среднеширотной ионосфере [28 – 31, 203, 205 – 237]. Важно, что во время бурь среднеширотная ионосфера приобретает черты высокоширотной ионосферы: становится резко неста-

ционарной, в ней генерируются (усиливаются) плазменные неоднородности, на 1 – 2 порядка величины усиливается напряженность ионосферно-магнитосферного электрического поля, главный ионосферный провал сдвигается до широты, близкой к 50°, высыпание частиц и полярные сияния возникают на широте Харькова и даже Крыма и т. п.

В работах [227, 230, 231, 236, 237] дана разработанная нами классификация составляющих геокосмических бурь по их проявлениям.

### 6.10. Метеорные потоки

Роль метеорных потоков в системе СМСМИАЗ, конечно, не может сравниться с ролью возмущений солнечного ветра. Однако при определенных условиях метеорные потоки могут приводить к заметным возму-

щениям атмосферы и ионосферы на высотах  $z \approx 50 - 120$  км. Ранее в основном изучались процессы, вызванные отдельными метеорами (см., например, [238, 239]). Хорошо известно, что метеорные тела способны создавать сильные кратковременные и локализованные возмущения. Для изучения процессов в системе СМСМИАЗ представляют интерес длительные усредненные крупномасштабные возмущения и стимулированные ими вторичные эффекты, способные вызвать перестройку взаимодействия подсистем. Таких возмущений следует ожидать при усилении метеорных потоков и, особенно, в течение сильнейших метеорных дождей.

В [11] приведены результаты оценок усредненных эффектов (табл. 10).

Таблица 10. Усредненные эффекты метеорных потоков.

Метеорный источник	$\Delta t$ , с	$P_m$ , $m^{-2}c^{-1}$	$P_r$ , $Вт \cdot m^{-2}$	$P_a$ , $Вт \cdot m^{-2}$	$\Delta q$ , $m^{-3}c^{-1}$	$\Delta N$ , $m^{-3}$	$\Delta m$ , кг	$\Delta T_a$ , К
Фон	$10^5$	$5 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^4$	$10^7$	$3 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Поток	$10^5$	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^6$	25
Сильнейший дождь	$10^3$	$5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^6$	25

Оказалось, что метеорный фон в среднем создает лишь очень незначительные возмущения в Е-области ионосферы. Усилившийся в  $10^3$  раз метеорный поток приведет к заметным изменениям температуры газа и к значительной дополнительной ионизации в этой области. Сильнейший метеорный дождь (например, при прохождении потока Драконид) способен увеличить  $N$  в Е-области ионосферы в десятки – тысячи раз днем и ночью соответственно. Продолжительность этого процесса, однако, не превышает 15 мин.

Плотность потока энергии излучения акустических волн и ВГВ становится ощутимой лишь при выпадении сильнейшего метеорного дождя.

Естественно, метеорные потоки могут непосредственно запылять верхнюю атмо-

сферу и вызывать оптические эффекты, подобные тем, что имеют место при извержениях вулканов.

Следовательно, в отдельных случаях увеличение  $N$  и  $T_a$  в Е-области ионосферы может привести к перестройке взаимодействий подсистем в системе СМСМИАЗ.

Совсем к другим по величине эффектам в обсуждаемой системе приведет падение крупных космических тел. Эти эффекты рассматриваются, например, в работах [240 – 242]. Падение болидов вызывает относительно небольшие возмущения в системе СМСМИАЗ [243 – 245].

Таким образом, явления, связанные со значительным энерговыделением в системах СМСМИАЗ и ЗАИМ, приводят к перестройке взаимодействия всех ее подсистем, к нели-

нейности процессов, срабатыванию триггер-эффектам “последствия” и т. п. ных механизмов высвобождения энергии, к

**Литература:** [1] Данилов А. Д., Казимировский Э. С., Вергасова Г. В., Хачикян Г. Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. – Л.: Гидрометеиздат – 1986; [2] Казимировский Э. С., Козууров В. Д. Метеорологические эффекты в ионосфере (Обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1995. – Т. 35. – № 3. – С. 1 – 23; [3] Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмо-электромагнитные явления. – М.: Наука. – 1988; [4] Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений. – М.: Наука. – 1992; [5] Садовский М. А., Писаренко В. Ф. Случайность и неустойчивость в геофизических процессах // Физика Земли. – 1989. – № 2. – С. 3 – 11; [6] Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. – М.: МИФИ. – 2000. – 448 с.; [7] Pulinets S., Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earthquakes. – Berlin: Springer-Verlag. – 2004. – XIII, 315 pp.; [8] Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. – М.: Наука. – 2008. – 295 с.; [9] Черногор Л. Ф. Глобальные эффекты при локальном энерговыделении в Геосфере // Всесоюзная конференция «Нетрадиционные научные идеи о природе и ее явлениях». – Гомель, 1990. – Т. 2. – С. 221 – 229; [10] Черногор Л. Ф. Геокосмосфера – открытая динамическая нелинейная система // Вісник Харківського університету. Радіофізика та електроніка. – 2002. – № 570. – Вип. 2. – С. 175 – 180; [11] Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия – 2003. – Т. 8. – № 1. – С. 59 – 106; [12] Черногор Л. Ф. Земля–атмосфера–геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія. – 2003. – Т. 9. – № 5/6. – С. 96 – 105; [13] Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир. – 2006. – Т. 4. – № 12. – С. 655 – 697; [14] Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5. – № 4. – С. 225 – 246; [15] Залюбовский И. И., Черногор Л. Ф., Розуменко В. Т. Система Земля – атмосфера – геокосмос: основные свойства, процессы и явления // Космічні дослідження в Україні. 2006 – 2008. Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАНУ-НКАУ. – К. – 2008. – С. 19 – 29; [16] Zalyubovskiy I., Chernogor L., Rozumenko V. 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. – Pp. 19 – 29; [17] Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2008. – V. 13. – № 2. – Pp. 120 – 137; [18] 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; [19] Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина. – 2008; [20] Chernogor L. F. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – V. 32. – No 11. – Pp. 3199 – 3218; [21] Черногор Л. Ф. Физика геокосмоса и космическая погода: системный подход, достижения, стратегия исследований / В кн. Перспективы космических исследований Украины / Науч. ред. О. П. Федоров. – К.: Академперіодика. – 2011. – С. 55 – 61; [22] Домнин И. Ф., Котов Д. В., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Исследование физических процессов в геокосмосе над Украиной при помощи радара некогерентного рассеяния / В кн. Перспективы космических исследований Украины / Науч. ред. О. П. Федоров. – К.: Академперіодика. – 2011. – С. 62 – 74; [23] Физика космоса. Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия. – 1986; [24] Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Roble R. G., Richmond A. D. How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm? / Bruce T. Tsurutani, Walter D. Gonzalez, Yohsuke Kamide, John K. Arballo (eds.). Magnetic Storm. – Geophysical Monograph 98, American Geophysical Union, Washington, D.C. – 1997; [25] Prölss G W. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere / Bruce T. Tsurutani, Walter D. Gonzalez, Yohsuke Kamide, John K. Arballo (eds.) Magnetic Storm. – Geophysical Monograph 98, American Geophysical Union, Washington, D.C. – 1997; [26] Монин А. С., Шишков Ю. А. Климат как проблема физики // УФН. – 2000. – Т. 170. – № 4. – С. 419 – 445; [27] Авдюшин С. И., Данилов А. Д. Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему (Обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2000. – Т. 40. – № 5. – С. 3 – 14; [28] Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С. и др. 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; [29] Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С. и др. 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; [30] Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф. и др. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1 // ЗР. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – № 7. – С. 3 – 15; [31] Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф. и др. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 2 // ЗР. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – № 8. – С. 3 – 19; [32] Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S.,

Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Fedorenko Y. P., Tsymbal A. M., and Chernogor L. F. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – V. 53. – N. 4 – 5. – Pp. 6 – 20; [33] Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Fedorenko Y. P., Tsymbal A. M., and Chernogor L. F. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 2. Processes in a Modified Ionosphere. Signal Parameter Variations. Disturbance Simulation // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – V. 53. – N. 6. – Pp. 1 – 22; [34] Черногор Л. Ф. Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта “Передвижения” // Космічна наука і технологія. – 1999. – Т. 5. – № 1. – С. 38 – 47; [35] Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир. – 1980; [36] Синергетика. – М.: Мир. – 1984; [37] Беспалов П. А., Трахтенгерц В. Ю. Альвовские лазеры. – Горький: ИПФ АН СССР. – 1986. [38] Изаков М. Н. Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах. – УФН. – 1997. – Т. 167. – № 20. – С. 1087 – 1094; [39] Заславский Г. М., Сагдеев Р. З. Введение в нелинейную физику. От маятника до турбулентности и хаоса. – М.: Наука. – 1988; [40] Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. – М.: Мир. – 1980; [41] Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. – М.: Мир. – 1984; [42] Шустер Г. Г. Детерминированный хаос: Введение. – М.: Мир. – 1988; [43] Климонтович Ю. Л. Критерии относительной степени упорядоченности открытых систем // УФН. – 1996. – Т. 166. – № 11. – С. 1231 – 1243; [44] Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. – М.: Мир. – 1973; [45] Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир. – 1979; [46] Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. – М.: Мир. – 1979; [47] Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир. – 1985; [48] Васильев В. А., Романовский Ю. М., Юхно В. Г. Автоволновые процессы. – М.: Наука. – 1987; [49] Лоскутов А. Ю., Михайлов А. С. Введение в синергетику. – М.: Наука. – 1990; [50] Гульельми А. В. МГД-волны в околоземной плазме. – М.: Мир. – 1979; [51] Petviashvili V. I., Pokhotelov O. A. Solitary waves in Plasmas and in the Atmosphere. – Gordon and Breach Science Publishers Reading. – 1992; [52] Похотелов О. А., Стенфло Л., Шукла П. К. Нелинейные структуры в магнитосфере и атмосфере Земли // Физика плазмы. – 1996. – Т. 22. – № 10. – С. 941 – 953; [53] Абурджания Г. Д. Самоорганизация акустико-гравитационных вихрей в ионосфере перед землетрясением // Физика плазмы. – 1996. – Т. 22. – № 10. – С. 954 – 959; [54] Кернер Б. С., Осипов В. В. Автосолитоны. – М.: Наука. – 1991; [55] Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. – М.: Наука. – 1984; [56] Бакай А. С., Солодовников Г. К. О нелинейных волновых структурах в ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. – 1986. – Т. 29. – № 6. – С. 645 – 653; [57] Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения // ЗР. Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 6. – С. 17 – 40; [58] Карпман В. И. Нелинейные волны в диспергирующих средах // М.: Наука. – 1973; [59] Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. – М.: Мир. – 1977; [60] Мальцев Ю. П. Нелинейная стадия двухпоточковой неустойчивости // Геомагнетизм и аэрономия. – 1992. – Т. 32. – № 3. – С. 109 – 113; [61] Арыков А. А., Мальцев Ю. П. Эволюция быстро движущейся неоднородности в E-области ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. – 1995. – Т. 35. – № 6. – С. 161 – 163; [62] Nielsen E., Schlegel K. J. A first comparison of STARE and EISCAT electron drift velocity measurements // J. Geophys. Res. – 1983. – V. 88. – Pp. 5745 – 5751; [63] Свирижнев Ю. М. Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. – М.: Наука. – 1987; [64] Деминова Г. Ф., Деминов М. Г., Ерухимов Л. М. и др. Об уединенной внутренней гравитационной волне в области F ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. – 1982. – Т. 22. – № 2. – С. 211 – 215; [65] Данов К. Д. Об одной модели уединенных внутренних гравитационных волн в безграничной изотермической атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. – 1989. – Т. 29. – № 2. – С. 343 – 345; [66] Афраймович Э. Л., Воейков С. В. Экспериментальное доказательство существования уединенной внутренней гравитационной волны в атмосфере Земли во время мощной магнитной бури 30. 10. 2003 г. // ДАН. – 2004. – Т. 399. – № 5. – С. 683 – 686; [67] Пушин В. Ф., Тьрнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Моделирование вариаций характеристик радиосигналов ионозондов декаметрового диапазона, вызываемых движением нелинейных внутренних гравитационных волн в атмосфере Земли // Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – № 7. – С. 18 – 27; [68] Пушин В. Ф., Черногор Л. Ф. Эффект Доплера ионосферных радиосигналов, вызванный распространением нелинейной уединенной волны плотности // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т. 12. – № 11. – С. 33 – 40. [69] Мареев Е. А., Мареева О. В. Нелинейные структуры электрического поля и заряда в атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. – 1999. – Т. 39. – № 6. – С. 74 – 79; [70] Петвиашвили В. И., Похотелов О. А. Уединенные волны в плазме и магнитосфере. – М.: Энергоиздат. – 1988; [71] Каменец Ф. Ф., Коробов И. И., Иванов М. Ф. и др. Нелинейные механизмы образования крупномасштабных вихрей в атмосферах планет // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1998. – Т. 3. – № 2. – С. 35 – 45; [72] Абурджания Г. Д. Самоорганизация нелинейных вихревых структур и вихревой турбулентности в диссипативных средах. – М.: КомКнига. – 2006; [73] Пушин В. Ф., Черногор Л. Ф. Эффекты ионосферных декаметровых радиосигналов, вызванные распространением кноидальных волн концентрации электронов // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14. – № 2. – С. 150 – 161; [74] Мареев Е. А., Сорокин А. Е. Автоволновые режимы электризации грозового облака // Изв. вузов. Радиофизика. – 2001. – Т. 44. – № 1 – 2. – С. 148 – 162; [75] Козелов Б. И., Козелова Т. В. Спонтанные и стимулированные события в системе с самооргани-

защией и их аналогия с магнитосферными суббурями // Геомагнетизм и аэрономия. – 2002. – Т. 42. – № 1. – С. 59 – 66; [76] Блюх П. В., Николаенко А. П., Филиппов Ю. Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля–ионосфера. – Киев: Наукова думка. – 1977; [77] Ляцкий В. Б., Мальцев Ю. П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. – М.: Наука. – 1988; [78] Tinsley B. A. Solar wind modulation of the global electric circuit and apparent affection cloud microphysics, latent heat release, and tropospheric dynamics // J. Geomagn. Geoelectr. – 1996. – V. 48. – Pp. 165 – 172; [79] Пудовкин М. И., Распопов О. М. Механизмы воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и магнитосферы // Геомагнетизм и аэрономия. – 1992. – Т. 32. – № 5. – С. 1 – 22. [80] Ролдугин В. К., Ващенко Э. В. Механизмы воздействия солнечной активности на состояние нижней ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. – 1994. – Т. 34. – № 2. – С. 155 – 158; [81] Старков Г. В., Ролдугин В. К. Изменение прозрачности атмосферы под действием солнечных космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. – 1994. – Т. 34. – № 2. – С. 156 – 159; [82] Ермаков В. И. Роль грозных облаков в механизме связи погоды с солнечной активностью // Геомагнетизм и аэрономия – 2000. – Т. 40. – № 1. – С. 129 – 132; [83] Герман Дж. Р., Голдберг Р. А. Солнце, погода и климат. – Л.: Гидрометеиздат. – 1981; [84] Гельберг М. Г. Ионосферный триггер магнитосферных возмущений // Геомагнетизм и аэрономия. – 1994. – Т. 34. – № 1. – С. 48 – 53; [85] Сытинский А. Д. Связь сейсмичности Земли с состоянием межпланетной среды и атмосферными процессами. – Л.: Гидрометеиздат. – 1987; [86] Сомских В. М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. – Алма-Ата: Наука. – 1983; [87] Таращук Ю. Е., Нагорский П. М., Борисов Б. Б. и др. Нестационарные процессы в ионосфере Земли и их влияние на распространение радиоволн. – Томск: Изд-во Томского университета. – 1986; [88] Davies K. Ionospheric Radio. – London: Peter Peregrinus Ltd. – 1990; [89] Намазов С. А., Новиков В. Д., Хмельницкий И. А. Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении декаметровых радиоволн (Обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. – 1975. – Т. 18. – № 4. – С. 473 – 500; [90] Bolt B. A. Seismic Air Waves from the Great Alaskan Earthquake // Nature. – 1964. – V. 202. – No 4937. – Pp. 1095 – 1096; [91] Donn W. L., Posmentier E. S. Ground-Coupled Air Waves from the Great Alaskan Earthquake // J. Geophys. Res. – 1964. – V. 69. – No 24. – Pp. 5357 – 5361; [92] Davies K., Baker D. M. Ionospheric Effects Observed around the Time of the Alaskan Earthquake of March 28 // J. Geophys. Res. – 1965. – V. 70. – No 9. – Pp. 2251 – 2253; [93] Row R. V. Evidence of Long-Period Acoustic Gravity Waves Launched into the F Region by the Alaskan Earthquake of March 28 // J. Geophys. Res. – 1966. – V. 71. – No 1. – Pp. 343 – 345; [94] Пустоветов В. П., Гинзбург Е. В., Малышев А. Б., Прошкина И. П. О вариациях потока высокоэнергичных частиц во внутреннем радиационном поясе // Космические исследования. – 1993. – Т. 31. – № 3. – С. 123 – 127; [95] Пустоветов В. П., Малышев А. Б. Пространственно-временная корреляция землетрясений и вариаций потока высокоэнергичных частиц во внутреннем радиационном поясе // Космические исследования. – 1993. – Т. 31. – № 5. – С. 84 – 90; [96] Гинзбург Е. В., Малышев А. Б., Прошкина И. П., Пустоветов В. П. Корреляция сильных землетрясений с вариациями потока частиц радиационного пояса // Геомагнетизм и аэрономия. – 1994. – Т. 34. – № 3. – С. 60 – 66; [97] Электромагнитные предвестники землетрясений. – М.: Наука. – 1982; [98] Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Герасимович Е. А., Матвеев И. В. Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений. – М.: Наука. – 1985; [99] Бучаченко А. Л., Ораевский В. Н., Похотелов О. А. и др. Ионосферные предвестники землетрясений // УФН. – 1996. – Т. 166. – № 9. – С. 1023 – 1029; [100] Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction. Edited by M. Hayakawa and Y. Fujinawa. – Tokyo: TERRAPUB. – 1994; [101] Сорокин В. М., Чмырев В. М. Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф // Геомагнетизм и аэрономия. – 2002. – Т. 42. – № 6. – С. 821 – 830; [102] Пасечник И. П. Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях. – М.: Наука. – 1979; [103] Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. – М.: Энергоиздат. – 1982; [104] Гармаш К. П., Гритчин А. И., Леус С. Г. и др. Исследование реакции ионосферной плазмы на воздействие подземных, наземных, воздушных взрывов и землетрясений // Физика космической плазмы. Сборник трудов Международного семинара, 6 – 10 июня 1993 года, Киев, Украина. – Киев. Национальное космическое агентство Украины, Главная астрономическая обсерватория АН Украины, Киевский университет им. Тараса Шевченка. – 1994. – С. 151 – 160; [105] Долюницына Э. Г., Дробязко И. Н., Павлов В. А. О влиянии землетрясений на концентрацию электронов в слое F ионосферы // Изв. вузов Радиофизика – 1981 – Т. 24. – № 7. – С. 783 – 793; [106] Baba K., Hayakawa M. The Effect of Localized Ionospheric Perturbations on Subionospheric VLF Propagation on the Basis of the Finite Element Method // In book: Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction / Edited by M. Hayakawa and Y. Fujinawa. – Tokyo: TERRAPUB. – 1994. – P. 399 – 407; [107] Calais E., Minster J. B. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake // Geophys. Res. Lett. – 1995. – V. 22. – P. 1045 – 1048; [108] Calais E., Minster J. B., Bernard J. GPS, Earthquake, the ionosphere and Space Shuttle // Physics of Earth and Planet. – 1998a. – V. 105. – P. 167 – 181; [109] Calais E., Minster J. B., Hofton M. A., Hedlin M. A. H. Ionosphere signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements // Geophys. J. Int. – 1998b. – V. 132. – P. 191 – 202. [110] Afraimovich E. L., Perevalova N. P., Plotnikov A. V., Uralov A. M. The shock-acoustic waves generated by the earthquakes // Annales Geophysicae. – 2001. – V. 19. – No. 4. – P. 395 – 409; [111] Афраймович Э. Л., Кирюшкин В. А., Перевалова Н. П. Определение характеристик ионосферного возмущения в ближней зоне эпицентра землетрясения // Радиотехника и электроника. – 2002. – Т. 47. – № 7. – С. 822 – 830; [112] Ducic V., Artru J., Lognonne P. Ио-



nospheris remote sensing of the Denali earthquake Rayleigh surface waves // *Geophys. Res. Lett.* – 2003. – V. 30. – № 18. – P. 1951. doi:10.1029/2003GL017812; [113] *Garcia R., Crespon F., Ducic V., Lognonné P.* Three-dimensional ionospheric tomography of post-seismic perturbations produced by the Denali earthquake from GPS data // *Geophys. J. Int.* – 2005. – V. 163. – P. 1049 – 1064; [114] *Heki K., Ping J.* Directivity and apparent velocity of the coseismic traveling ionospheric disturbances observed with a dense GPS array // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2005. – V. 236. – P. 845 – 855; [115] *Astafyeva E. I., Afraimovich E. L.* Long-distance propagation of traveling ionospheric disturbances caused by the great Sumatra-Andaman earthquake on 26 December 2004 // *Earth Planets Space.* – 2006. – V. 58. – P. 1025 – 1031; [116] *Afraimovich E. L., Astafieva E. I., Kirushkin V. V.* Localization of the source of ionospheric disturbance generated during an earthquake // *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy.* – 2006. – V. 6. – G12002, doi:10.1029/2004GI000092; [117] *Heki K., Otsuka Y., Choosakul N., Hemmakorn N., Komolmis T., Maruyama T.* Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 great Sumatra earthquake with coseismic ionospheric disturbances // *J. Geophys. Res.* – 2006. – V. 111. doi:10.1029/2005JB004202; [118] *Liu J. Y., Tsai Y. B., Chen S. W., Lee C. P., Chen Y. C., Yen H. Y., Chang W. Y., Liu C.* Giant ionospheric disturbances excited by the M9.3 Sumatra earthquake of 26 December 2004 // *Geophys. Res. Lett.* – 2006. – V. 33, L0213, doi:10.1029/2005GL023963; [119] *Shinagawa H., Iyemori T., Saito S., Maruyama T.* A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatra earthquake on December 26, 2004 // *Earth, Planets and Space* – 2007. – V. 59. – P. 1015 – 1026; [120] *Кирюшкин В. В., Афраимович Э. Л., Астафьева Э. И.* Эволюция сейсмо-ионосферных возмущений по данным плотной сети станции GPS // *Космические исследования.* – 2011. – Т. 49. – № 3. – С. 236 – 248; [121] *Fougere P. F., Tsocoyeanes C. W.* AFGL magnetometer observations of Mount St. Helens eruption // *Eos, Trans. AGU.* – 1980. – V. 61. – P. 1209 – 1210; [122] *Roberts D. H., Klobuchar J. A., Fougere P. F., Hendrickson D. H.* A large-amplitude traveling ionospheric disturbance produced by the May 18, explosion of Mount St. Helens // *J. Geophys. Res.* – 1982. – V. 87. – No. A8. – P. 6291 – 6301; [123] *Liu C. H., Klostermeyer J., Yeh K. C., Jones T. B., Robinson T., Holt O., Leitingner R., Ogawa T., Sinno K., Kato S., Ogawa T., Bedard A. J., Kersley L.* Global dynamic responses of the atmosphere to the eruption of Mount St. Helens on May 18, 1980 // *J. Geophys. Res.* – 1982. – V. 87. – No. A8. – P. 6281 – 6290; [124] *Roberts D. H., Rogers A. E. E., Allen B. R., Bennett C. L., Burke B. F., Greenfield P. E., Lawrence C. R., Clark T. A.* Radio Interferometric Detection of a Traveling Ionospheric Disturbance Excited by the Explosion of Mount St. Helens // *J. Geophys. Res.* – 1982. – V. 87. – No. A8. – P. 6302 – 6306; [125] *Госсад Э., Хук У.* Волны в атмосфере. – М: Мир. – 1978; [126] *Дробязко И. Н., Красильников В. Н.* Генерация акустико-гравитационных волн атмосферной турбулентностью // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1985. – Т. 28. – № 11. – С. 1357 – 1365; [127] *Дробязко И. Н., Красильников В. Н.* Распространение внутренних гравитационных волн в атмосферном волноводе, возбуждаемом турбулентными вихрями // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1988. – Т. 31. – № 7. – С. 771 – 777; [128] *Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н. и др.* Вариации магнитного поля в Антарктиде и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2004. – Т. 9. – № 2. – С. 130 – 151; [129] *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. – Т. 14. – № 5. – С. 6 – 36; [130] *Черногор Л. Ф.* Тропический циклон как элемент системы Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера // *Космічна наука і технологія.* – 2006. – № 1/2. – С. 3 – 46; [131] *Исаев Н. В., Сорокин В. М., Чмырев В. М., Серебрякова О. Н.* Электрические поля в ионосфере, связанные с морскими штормами и тайфунами // *Геоматематизм и аэрономия.* – 2002. – Т. 42. – № 5. – С. 670 – 675; [132] *Исаев Н. В., Сорокин В. М., Чмырев В. М. и др.* Возмущение электрического поля в ионосфере морскими штормами и тайфунами // *Космические исследования.* – 2002. – Т. 40. – № 6. – С. 591 – 597; [133] *Ярошевич М. И., Ингель Л. Х.* Тропический циклон как элемент системы океан–атмосфера // *ДАН.* – 2004. – Т. 399. – № 3. – С. 397 – 400; [134] *Черногор Л. Ф.* Инфразвуковое воздействие землетрясений и их предвестников на параметры околоземного пространства // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 1997. – Т. 2. – № 4. – С. 463 – 472; [135] *Григорьев Г. И.* Акустико-гравитационные волны в атмосфере (Обзор) // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1999. – Т. 42. – № 1. – С. 3 – 24; [136] *Пономарев Е. А., Ерущенков А. И.* Инфразвуковые волны в атмосфере Земли (Обзор) // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1977. – Т. 20. – № 12. – С. 1773 – 1789; [137] *Шулейкин В. В.* Расчет развития и затухания тропических ураганов и главных волн, создаваемых ураганами. – Л.: Гидрометеиздат. – 1978; [138] *Бреховских Л. М.* Об излучении инфразвука в атмосферу океаническими волнами // *Изв. АН СССР, серия «Физика атмосферы и океана».* – 1968. – Т. 4. – № 4. – С. 444 – 450; [139] *Holzworth R. Y., Kelly M. S., Siefring C. L. et al.* Electrical measurements in the atmosphere and the ionosphere over an active thunderstorm. 2. Direct current electric fields and conductivity // *J. Geophys. Res.* – 1985. – V. 90. – № A10. – Pp. 9824 – 9832; [140] *Kelly M. S., Siefring C. L., Pfaff R. F. et al.* Electrical measurements in the atmosphere and the ionosphere over an active thunderstorm. 1. Campaign overview and initial ionospheric results // *J. Geophys. Res.* – 1985. – V. 90. – № A10. – Pp. 9815 – 9824; [141] *Mikhailowa G., Mikhailow Ya., Kapustina O.* ULF–VLF electric fields in the external ionosphere over powerful typhoons in Pacific oceans // *International J. Geomag. Aeronomy.* – 2000. – V. 2. – № 2. – Pp.153 – 158; [142] *Атмосфера. Справочник.* – Л.: Гидрометеиздат. – 1991; [143] *Ивлев Л.С.* Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. – Л.: Гидрометеиздат. – 1982; [144] *Кондратьев К. Я., Поздняков Д. В.* Аэрозольные модели атмосферы. – М: Наука. – 1981; [145] *Петренчук О. П.* Экспериментальные исследования

атмосферного аэрозоля. – Л: Гидрометеиздат. – 1979; [146] Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. Пер. с англ. – М: Мир. – 1987; [147] Краус Е. Б. Взаимодействие атмосферы и океана. – Л: Гидрометеиздат. – 1979; [148] Гилл А. Динамика атмосферы и океана. – М: Мир. – 1986. – Том. 1,2; [149] Хаин А. П., Сутырин Г. Г. Тропические циклоны и их взаимодействие с океаном. – Л: Гидрометеиздат. – 1983; [150] Кшевецкий С. П., Гаврилов Н. М. Вертикальное распространение нелинейных гравитационных волн и их разрушение в атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. – 2003. – Т. 43. – № 1. – С. 74 – 82. [151] Гвишвили Г. В. Квазистационарные ионосферные неоднородности и мелкомасштабные ячейки циркуляции свободной атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. – 1990. – Т. 30. – № 1. – С. 90 – 97; [152] Сорокин В.М., Чмырев В.М. О неустойчивости акустогравитационных волн в ионосфере под действием электрического поля // Геомагнетизм и аэрономия. – 1999. – Т. 39. – № 5. – С. 38 – 45; [153] Сомсиков В. М., Троицкий Б. В. Генерация возмущений в атмосфере при прохождении через нее солнечного терминатора // Геомагнетизм и аэрономия. – 1975. – Т. 15. – № 5. – С. 856 – 860; [154] Антонова В. П., Гусейнов Ш. Ш., Дробжес В. И., Зусманович А. Г., Каримов К. А., Козин И. Д., Курмангалиев Д. А., Лосовский Б. Я., Ляджин В. А. Комплексное экспериментальное исследование волн в атмосфере, генерируемых солнечным терминатором // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1988. – Т. 24. – № 2. – С. 134 – 143; [155] Сомсиков В. М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэрономия. – 1991. – Т. 31. – № 1 – С. 1 – 12; [156] Сомсиков В. М. О генерации турбулентности атмосферы солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэрономия. – 1992. – Т. 32. – № 3. – С. 55 – 59; [157] Гоков А. М., Гритчин А. И. Влияние солнечного терминатора на среднеширотную D-область ионосферы и характеристики частично отраженных КВ-сигналов и радиозумов // Геомагнетизм и аэрономия. – 1994. – Т. 34. – № 2. – С. 169 – 172; [158] Afraimovich E. L. First GPS-TEC evidence for the wave structure excited by the solar terminator // Earth Planets Space. – 2008. – V. 60. – P. 895 – 900; [159] Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование естественно-возмущенной средней ионосферы // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4. – № 3. – С. 209 – 226; [160] Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8. – № 2. – С. 143 – 162; [161] Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации вблизи г. Харькова, сопутствовавшие прохождению солнечного терминатора. 1. Результаты спектрального анализа // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15. – № 5. – С. 43 – 51; [162] Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации вблизи г. Харькова, сопутствовавшие прохождению солнечного терминатора. 2. Результаты статистического анализа // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15. – № 6. – С. 14 – 19; [163] Afraimovich E. L., Edemsky I. K., Voeykov S. V., Yasukevich Yu. V., and Zhivetiev I. V. MHD Nature of Ionospheric Wave Packets Generated by the Solar Terminator // Geomagnetism and Aeronomy. – 2010. – Vol. 50. – № 1. – Pp. 79 – 95; [164] Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдений процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5. – № 4. – С. 348 – 360; [165] Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5. – № 4. – С. 361 – 370; [166] Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5. – № 4. – С. 371 – 375; [167] Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И. и др. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // ЗР. Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – № 2. – С. 25 – 63; [168] Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А. и др. Динамические процессы в ионосфере во время геокосмической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года // Космічна наука і технологія. – 2004. – Т. 10. – № 1. – С. 12 – 25; [169] Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности атмосферно-ионосферных эффектов солнечного затмения 31 мая 2003 года: результаты оптических и радиофизических наблюдений в Харькове // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 3. – С. 55 – 70; [170] Акимов Л. А., Боговский В. К., Григоренко Е. И. и др. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – Т. 45. – № 4. – С. 526 – 551; [171] Akimov L. A., Bogovskii V. K., Grigorenko E. I. et al. Atmospheric-Ionospheric Effects of the Solar Eclipse of May 31, 2003, in Kharkov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2005. – V. 45. – No 4. – Pp. 494 – 518; [172] Акимов Л. А., Акимов Л. А., Черногор Л. Ф. Параметры турбулентных процессов в атмосфере, сопровождавших затмения Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12. – № 2. – С. 117 – 134; [173] Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13. – № 6. – С. 74 – 86; [174] Григоренко Е. И., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48. – № 3. – С. 350 – 364; [175] Grigorenko E. I., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Effects of Solar Eclipse of March 29, 2006, in the Ionosphere and Atmosphere // Geomagnetism and Aeronomy. – 2008. – V. 48. – No 3. – Pp. 337 – 351; [176] Бурмака В. П., Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Лысенко В. Н., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 3. – С. 38 – 53;

[177] Chernogor L. F. Effects of Solar Eclipses in the Surface Atmosphere // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2008. – V. 44. – No 4. – Pp. 432 – 447; [178] Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 2. Моделирование и обсуждение результатов // *Космічна наука і технологія*. – 2008. – Т. 14. – № 1. – С. 57 – 64; [179] Дзюбанов Д. А., Емельянов Л. Я., Черногор Л. Ф. Динамика плазмы ионосферы над Харьковом в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. // *Космічна наука і технологія*. – 2009. – Т. 15. – № 3. – С. 62 – 69; [180] Емельянов Л. Я., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений // *Космічна наука і технологія*. – 2009. – Т. 15. – № 3. – С. 70 – 81; [181] Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 2. Результаты расчетов и обсуждение // *Космічна наука і технологія*. – 2009. – Т. 15. – № 4. – С. 3 – 11; [182] Емельянов Л. Я., Скляров И. Б., Черногор Л. Ф. Отклик ионосферы на солнечное затмение 1 августа 2008 г.: результаты вертикального зондирования // *Космічна наука і технологія*. – 2009. – Т. 15. – № 4. – С. 12 – 21. [183] Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Радиофизические наблюдения волновых возмущений в ионосфере в период частного солнечного затмения 1 августа 2008 г. // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2009. – Т. 14. – № 4. – С. 390 – 402; [184] Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Вариации радишумов СЧ-диапазона над Харьковом в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. // *Космічна наука і технологія*. – 2009. – Т. 15. – № 6. – С. 20 – 27; [185] Черногор Л. Ф. Вариации амплитуды и фазы ОНЧ радиоволн в ионосфере в период солнечного затмения 1 августа 2009 г. // *Геоматетизм и аэрономия*. – 2010. – Т. 50. – № 1. – С. 96 – 106; [186] Chernogor L. F. Variations in the Amplitude and Phase of VLF Radiowaves in the Ionosphere during the August 1, 2008, Solar Eclipse // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2010. – V. 50. – No 1. – Pp. 100 – 110. [187] Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики доплеровских спектров радиосигналов, отраженных от естественно-возмущенной ионосферы // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2010. – Т. 15. – № 1. – С. 24 – 38; [188] Panasenko S. V., Chernogor L. F. Statistics of Doppler spectra of radio signals reflected from a naturally disturbed ionosphere // *Radio Physics and Radio Astronomy*. – 2010. – V. 1. – No 3. – Pp. 197 – 209; [189] Акимов А. Л., Черногор Л. Ф. Эффекты солнечного затмения 1 августа 2008 г. в приземной атмосфере // *Кинематика и физика небесных тел*. – 2010. – Т. 26. – № 3. – С. 58 – 74; [190] Akimov A. L., Chernogor L. F. Effects of the Solar Eclipse of August 1, 2008 on the Earth's Lower Atmosphere // *Kimematics and Physics of Celestial Bodies*. – 2010. – V. 26. – № 3. – P. 135 – 145; [191] Черногор Л. Ф. Волновой отклик ионосферы на частное солнечное затмение 1 августа 2008 г. // *Геоматетизм и аэрономия*. – 2010. – Т. 50. – № 3. – С. 361 – 376; [192] Chernogor L. F. Wave Response of the Ionosphere to the Partial Solar Eclipse of August 1, 2008 // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2010. – V. 50. – № 3. – Pp. 346 – 361; [193] Бурмака В. П., Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф., Григоренко Е. И., Ляшенко М. В. Регулярные и нерегулярные процессы в ионосфере над Украиной // *Космічні дослідження в Україні 2008 – 2010* // Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАН України та НКА України. – Київ – 2010. – С. 37 – 50; [194] Burmaka V., Chernogor L., Domnin I., Grigorenko Ye., Lyashenko M. Regular and irregular processes in the ionosphere over Ukraine // *Space Research in Ukraine. – The Edition Report Prepared by the Space Research Institute of NAS of Ukraine and NSA of Ukraine, 2010*. – Pp. 35 – 47; [195] Черногор Л. Ф. Динамические процессы в приземной атмосфере в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. // *Известия Академии наук. Физика атмосферы и океана*. – 2011. – Т. 47. – № 1. – С. 84 – 95; [196] Chernogor L. F. Dynamic Processes in the Near-Ground Atmosphere during the Solar Eclipse of August 1, 2008 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2011. – V. 47. – № 1. – P. 77 – 86; [197] Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lyashenko M. V. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv // *International Journal of Remote Sensing*. – 2011. – V. 32. – No 11. – Pp. 3219 – 3229; [198] Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Отклик средней ионосферы на солнечное затмение 4 января 2011 г. в Харькове: Результаты вертикального зондирования // *Космічна наука і технологія*. – 2011. – Т. 17. – № 4. – С. 41 – 52; [199] Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф. Радиофизические эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г. на наклонных радиотрассах // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2011. – Т. 16. – № 2. – С. 164 – 176; [200] Garmash K. P., Leus S. G., Chernogor L. F. Radiophysical Effects of the January 4, 2011 Solar Eclipse as Observed in the Parameters of Obliquely Propagating HF Signals // *Radio Physics and Radio Astronomy*. – 2011. – V. 2. – No 4. – Pp. 325 – 337; [201] Гоков А. М., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Экспериментальное исследование реакции среднеширотной D-области ионосферы на рентгеновские и оптические вспышки // *Космічна наука і технологія*, 2005. – Т. 11. – № 3/4. – С. 56 – 67; [202] Burmaka V. P., Chernogor L. F. Wave Activity in the Ionosphere during the Magnetospheric Storm of November 7 – 10, 2004 // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2011. – V. 51. – No 3. – Pp. 305 – 320; [203] Григоренко Е. И., Лазоренко С. В., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождающие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // *Геоматетизм и аэрономия*. – 2003. – Т. 43. – № 6. – С. 770 – 787; [204] Иванов К. Г. О свойствах и природе "магнитных" областей в потоках межпланетной плазмы от мощных вспышек // *Геоматетизм и аэрономия*. – 1976. – Т. 16. – № 5. – С. 771 – 776; [205] Данилов А. Д. Популярная аэрономия. – Л.: Гидрометеиздат. – 1989; [206] Grigorenko E. I., Lazorenko S. V., Taran V. I., Chernogor L. F. Wave Disturbances in the Ionosphere Accompanying the Solar Flare and the Strongest Magnetic Storm of September 25, 1998 // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2003. – V. 43. – No 6. – Pp. 718 – 735; [207] Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты

радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2003. – № 9. – С. 57 – 94; [208] Григоренко Е. И., Дзюбанов Д. А., Лысенко В. Н. и др. Магнитная, ионосферная и атмосферная бури большой интенсивности в сентябре 1998 года: сравнение результатов измерений и моделирования // *Космічна наука і технологія*. – 2003. – Т. 9. – № 4. – С. 49 – 66; [209] Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А. и др. Статистические характеристики флуктуаций электромагнитного поля Земли // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2003. – Т. 8. – № 2. – С. 163 – 180; [210] Гармаш К. П., Лазоренко С. В., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Флуктуации электромагнитного поля Земли во время самой большой геокосмической бури 1999 г. // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2003. – Т. 8. – № 3. – С. 252 – 263; [211] Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пазюра С. А. и др. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года // *Космічна наука і технологія*. – 2004. – Т. 10. – № 1. – С. 4 – 11; [212] Алексеенко В. А. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Флуктуации геомагнитного поля накануне сильнейшей магнитной бури 1 октября 2002 года // *Космічна наука і технологія*. ДОДАТОК. – 2003. – Т. 9. – № 2. – С. 62 – 65; [213] Гармаш К. П., Леус С. Г., Похилько С. Н., Черногор Л. Ф. Магнитометрический мониторинг вариаций космической погоды // *Космічна наука і технологія*. ДОДАТОК. – 2003. – Т. 9. – № 2. – С. 82 – 85; [214] Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф., Черняев С. В. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года: результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2005. – № 4. – С. 4 – 20; [215] Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А. и др. Возмущения ионосферной плазмы во время сверхсильной магнитной бури 29 – 31 мая 2003 года: результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2005. – № 4. – С. 21 – 39; [216] Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Аномальная ионосферная буря 20 – 23 марта 2003 г.: результаты измерений и моделирования // *Космічна наука і технологія*. – 2005. – Т. 11. – № 3/4. – С. 4 – 19; [217] Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Сильнейшая геокосмическая буря 30 – 31 мая 2003 г.: результаты измерений и моделирования // *Космічна наука і технологія*. – 2005. – Т. 11. – № 3/4. – С. 20 – 37; [218] Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности ионосферной бури 20 – 23 марта 2003 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2005. – Т. 45. – № 6. – С. 789 – 802; [219] Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. А., Черногор Л. Ф., Черняев С. В. Динамические процессы в ионосфере во время сильнейшей магнитной бури 30 – 31 мая 2003 года // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2005. – Т. 45. – № 6. – С. 803 – 823; [220] Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., and Chernogor L. F. Specific Features of the Ionospheric Storm of March 20–23, 2003 // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2005. – V. 45. – No. 6. – Pp. 745 – 757; [221] Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernyayev S. V. Dynamic Processes in the Ionosphere during the Strongest Magnetic Storm of May 30 – 31, 2003 // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2005. – V. 45. – No. 6. – Pp. 758 – 777; [222] Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы во время магнитных бурь // *Космічна наука і технологія*. – 2005. – Т. 11. – № 5/6. – С. 12 – 21; [223] Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7 – 10 ноября 2004 г. 1. Результаты наблюдений // *Космічна наука і технологія*. – 2007. – Т. 13. – № 4. – С. 62 – 76; [224] Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7 – 10 ноября 2004 г. 2. Результаты расчетов и обсуждение // *Космічна наука і технологія*. – 2007. – Т. 13. – № 4. – С. 77 – 90; [225] Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Проявления геокосмической бури 7 – 10 ноября 2004 г. в нижней ионосфере // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2007. – Т. 47. – № 5. – С. 646 – 658; [226] Panasenکو S. V., Chernogor L. F. Event of the November 7 – 10, 2004 Magnetic Storm in the Lower Ionosphere // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2007. – V. 47. – No 5. – Pp. 608 – 620; [227] Chernogor, L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., and Taran V. I. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations // *Int. J. Geomagn. Aeron.* – 2007. – V. 7. – GI3001 – doi:10.1029/2005GI000125; [228] Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Ионосферные возмущения в течение сильнейшей магнитной бури 7 – 10 ноября 2004 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2007. – Т. 47. – № 6. – С. 761 – 779; [229] Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Pazyura S. A., Taran V. I., and Chernogor L. F. Ionospheric Disturbances during the Severe Magnetic Storm of November 7 – 10, 2004 // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2007. – V. 47. – No 6. – Pp. 720 – 738; [230] Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 1. // *Космічна наука і технологія*. – 2007. – Т. 13. – № 5. – С. 58 – 76; [231] Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 2. // *Космічна наука і технологія*. – 2007. – Т. 13. – № 5. – С. 77 – 96; [232] Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности ионосферной бури 4 – 6 апреля 2006 г. // *Космічна наука і технологія*. – 2008. – Т. 14. – № 1. – С. 65 – 76; [233] Черногор Л. Ф. Каналы воздействия вариаций космических и атмосферных факторов на биосферу и человека // *Фізіологічний журнал*. – 2010. – Т. 56. – № 3. – С. 25 – 40; [234] Потапов А. А., Черногор Л. Ф. Физические процессы в нелинейной системе Космос – Земля: каналы воздействия на биосферу (человека) // *Нелинейный мир*. – 2010. – Т. 8. – № 6. – С. 347 – 360; [235] Домнин И. Ф., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Харитонова С. В., Черногор Л. Ф. Динамические процессы в ионосфере в течение весьма умеренной магнитной бури 20 – 21 января 2010 г. // *Космічна наука і технологія*. – 2011. – Т. 17. – № 4. – С. 26 – 40; [236] Черногор Л. Ф., Розуменко В. Т. Физические эффекты в геокосмосе

в спокойных и возмущенных условиях // Космічні дослідження в Україні 2008 – 2010 / Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАН України та НКА України. – Київ – 2010. – С. 24 – 36; [237] Chernogor L., Rozumenko V. Physical effects in the geospace environment under quiet and disturbed conditions // Space Research in Ukraine. – The Edition Report Prepared by the Space Research Institute of NAS of Ukraine and NSA of Ukraine, 2010. – Рр. 22 – 34; [238] Бронитэн. В. А. Физика метеорных явлений. – М.: Наука. – 1981; [239] Лебединец В. Н. Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве. Метеоры. – Л.: Гидрометеиздат. – 1980; [240] Chapman C. R., Morrison D. Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard // Nature. – 1994. – V. 367. – Рр. 33 – 40; [241] Кручиненко В. Г., Волощук Ю. І., Кащеев Б. Л. та ін. Метеорно – астероїдна небезпека та доплив космічної речовини на Землю // Космічна наука і технологія. – 1999. – Т. 5. – № 1. – С. 3 – 17; [242] Черногор Л. Ф. Тунгусскому феномену – 100 лет. Космическая угроза и способы защиты планеты // Вісник Астрономічної школи. – 2009. – Т. 6. – № 1. – С. 44 – 55; [243] Черногор Л. Ф. Физические процессы, сопутствовавшие пролету Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Вісник Астрономічної школи. – 2009. – Т. 6. – № 1. – С. 30 – 43; [244] Черногор Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – Т. 51. – № 1. – С. 119 – 132; [245] Chernogor L. F. Oscillations of the Geomagnetic Field Caused by the Flight of Vitim Bolide on September 24, 2002 // Geomagnetism and Aeronomy. – 2011. – V. 51, № 1. – P. 116 – 130.

**Принято в печать 15.06.11**

**УДК. 550.388.-551.240.089**

**I СОЛНЦЕ – МЕЖПЛАНЕТНАЯ СРЕДА – МАГНИТОСФЕРА – ИОНОСФЕРА – АТМОСФЕРА –  
ЗЕМЛЯ КАК ОТКРЫТАЯ НЕРАВНОВЕСНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.**

**Черногор Л. Ф.**

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Украина, г. Харьков*

**I Earth–Atmosphere–Ionosphere–Magnetosphere  
as Opened Dynamic Nonlinear Physical System.**

**L. F. Chernogor**

The validation has been provided that the Earth-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system (EAIMS) is a complex open dynamic nonlinear system. The basic aspects of the system paradigm have been stated and they are illustrated by many instructive examples. The trigger mechanisms for energy release are demonstrated to be the most important property of the system.

It has been shown that highly energetic phenomena in the system give rise to a complex cluster of processes and to the reconstruction in the subsystem coupling.

It has been determined that energetic particle precipitation from the magnetosphere at middle latitudes accompanies the majority of nonsteady processes in the EAIMS.