

Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы

Л. Ф. Черногор

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,
Украина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 15 июля 2002 г.

Обосновано представление о том, что образование тектоносфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера (ТАИМ) является сложной открытой динамической нелинейной системой. Сформулированы основные положения системной парадигмы, которые иллюстрируются многими показательными примерами. Показано, что к важнейшим свойствам системы относится появление триггерных механизмов высвобождения энергии.

Продемонстрировано, что высокоэнергичные явления в системе вызывают в ней сложный комплекс процессов, перестройку характера взаимодействий подсистем.

Активные эксперименты в системе ТАИМ показали ограниченность линейного описания реакции подсистем на мощное энерговыделение, позволили установить возможность возникновения крупномасштабных и глобальных возмущений при локальном и локализованном энерговыделении, а также выявить и идентифицировать типы волн, переносящих указанные возмущения.

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

Обґрунтовано уявлення про те, що утворення тектоносфера-атмосфера-іоносфера-магнітосфера (ТАІМ) є складною відкритою динамічною нелінійною системою. Зформульовано основні положення системної парадигми, які ілюструються багатьма повчальними прикладами. Показано, що до найважливіших властивостей системи належить поява тригерних механізмів вивільнення енергії.

Продемонстровано, що високоенергійні явища в системі викликають в ній складний комплекс процесів, перебудову характеру взаємодій підсистем.

Активні експерименти в системі ТАІМ показали обмеженість лінійного опису реакції підсистем на потужне енерговиділення, дозволили встановити можливість виникнення великомасштабних і глобальних збурень при локальному і локалізованому енерговиділеннях, а також виявити та ідентифікувати типи хвиль, що переносять вказані збурення.

Встановлено, що висипання енергійних частинок з магнітосфери в середніх широтах супроводжує більшість нестационарних процесів у системі ТАІМ.

Содержание

- | | |
|---|--|
| 1. Введение | 3.2. Процессы в системе |
| 2. Основные положения системной парадигмы | 3.3. Взаимодействие подсистем |
| 3. Общие сведения о системе | 4. ТАИМ – открытая динамическая нелинейная система |
| 3.1. Строение системы | 4.1. Общие сведения |

- 4.2. Свойства системы
 - 5. Самоорганизация в системе и ее подсистемах
 - 5.1. Примеры
 - 5.2. Ударные волны
 - 5.3. Нелинейные волны
 - 5.4. Солитоны
 - 5.5. Нелинейные структуры
 - 5.6. Автоволны
 - 6. Триггерные механизмы в системе
 - 6.1. Высыпание энергичных частиц из магнитосферы
 - 6.2. Солнечно-погодные связи
 - 6.3. Ионосфера – триггер магнитосферных возмущений
 - 6.4. Триггерные эффекты приливов
 - 7. Высокоэнергичные явления в системе ТАИМ
 - 7.1. Землетрясения
 - 7.2. Вулканизм
 - 7.3. Глобальная грозовая активность
 - 7.4. Мощные атмосферные процессы
 - 7.5. Солнечный терминатор
 - 7.6. Затмение Солнца
 - 7.7. Солнечные вспышки
 - 7.8. Геокосмические бури
 - 7.9. Метеорные потоки
 - 8. Активные эксперименты в системе ТАИМ
 - 8.1. Мощное радиоизлучение
 - 8.2. Старты и полеты космических аппаратов
 - 8.3. Мощные взрывы
 - 9. Обсуждение
 - 10. Выводы
- Литература*

1. 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 исследования 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 эмергентности).

Важнейшим достижением физики 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 парадигмы¹, когда упомянутые оболочки рассматривались, как правило, изолированными друг от друга. Если же взаимодействие между двумя оболочками 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 аэрономии, геомагнетизму и т. д.). Ее истоки

¹Под парадигмой понимается совокупность исходных положений данной науки.

обнаруживаются в трудах В. И. Вернадского – крупнейшего естествоиспытателя первой половины XX века. Будучи основоположником геохимии, биогеохимии, радиогеологии и сторонником интеграции естественных наук, он, работая в докосмическую эру, конечно, не рассматривал процессы в верхней атмосфере, ионосфере и магнитосфере (в геокосмосе). Отдельные высказывания в пользу системного подхода можно найти в более новых работах [1-4]. Ценность системной парадигмы возросла после того, как автор настоящей работы [5] обратил внимание на то, что систему Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера следует рассматривать как сложную, открытую, динамическую и, главное, нелинейную систему с присущими ей нетривиальными свойствами. В обсуждении и обосновании этих свойств автор видит свою основную задачу².

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 удастся предсказать моменты времени перехода к хаотическому режиму, интервалы параметров его существования, типы хаотических структур и т. п.

В основном системная парадигма сформулирована автором в 80-е годы прошлого века, ее важнейшие положения изложены в [5]. Эта работа, к сожалению, малодоступна и малоизвестна. Ее результаты и их развитие представлены ниже.

Целью работы является формулировка основных положений системной парадигмы применительно к объекту Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера, обсуждение важнейших процессов в нем и обоснование представлений о главных свойствах этого объекта.

В настоящее время теория системы Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера дале-

ка от завершения. Ввиду этого для иллюстрации свойств системы приводятся многие поучительные примеры. С другой стороны, излагаются общие принципы, способные объяснить многие наблюдаемые процессы в обсуждаемой системе.

2. Основные положения системной парадигмы

1. Земля и околоземная среда образуют единую природную систему. Она состоит из подсистем – внутренних и внешних геосфер. Далее рассматриваются четыре подсистемы: тектоносфера (Т), атмосфера (А), ионосфера (И) и магнитосфера (М), формирующие систему (ТАИМ³). Ряд связей между ними уже установлен. Эти связи оказались существенными и даже определяющими.

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

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

3. ТАИМ – открытая система. В нее поступает излучение, вещество, энергия и энтропия как “снизу”, так и “сверху”.

4. ТАИМ – динамическая система. Ее 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. ТАИМ – нелинейная система. Исходные соотношения, описывающие соответствующие

²См. также работу: Л. Ф. Черногор. Геокосмосфера – открытая динамическая нелинейная система. Вісник Харківського університету. Радіофізика та електроніка. 2002, № 570, вип. 2, с. 175 – 180.

³Некоторые авторы вводят понятие системы литосфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (см. работу: С. Д. Живило, В. М. Івченко, І. О. Кременецький, Ю. Г. Рапопорт, О. К. Черемних. Укр. фіз. журн. 2000, 45, № 11, с. 1324 – 1332.

физико-химические процессы, являются нелинейными. Это приводит к далеко идущим последствиям при исследовании эволюции системы (к бифуркациям, неустойчивости системы, возникновению хаотических режимов и т. п.).

6. Земля и ее внешние оболочки в целом, а также ТАИМ в частности, представляют собой природные системы, способные к саморазвитию, усложнению и самоорганизации за счет использования внешних источников энергии, излучения, массы и т. д.

3. Общие сведения о системе

3.1. Структура системы

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 межпланетное пространство. 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 ТАИМ. Последняя отражает единство процессов внутри планеты и в окружающем ее пространстве.

3.2. 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 [6], который, как известно, представляет собой поток плазмы, “погруженной” в магнитное поле солнечного происхождения.

Электромагнитное излучение Солнца наблюдается в диапазоне длин волн λ 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 сложный комплекс процессов на Земле (рис. 1, 2), которые изучены в настоящее время недостаточно [7, 8]. 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 радиосуммов, 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 солнеч-

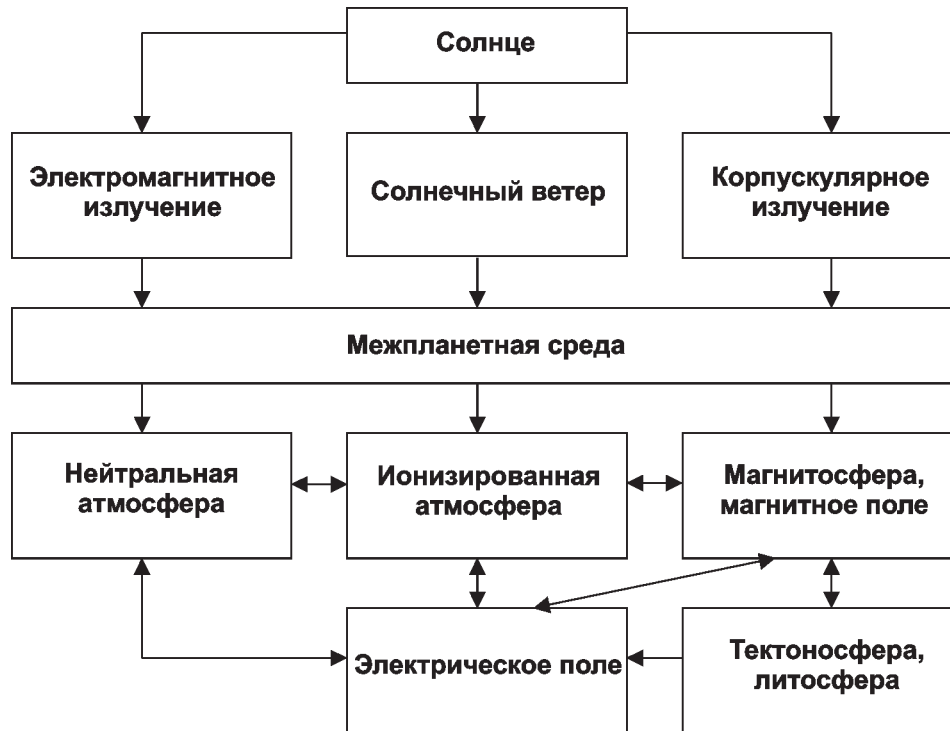


Рис. 1. Взаимодействие подсистем

ного происхождения. Воздействие этих факторов длится от 10 до 70 ч. В результате такой “бомбардировки” заметно деформируется магнитосфера и изменяется индукция геомагнитного поля (наступает магнитная буря), нагревается ионосфера, в ней в 2 + 10 раз уменьшается концентрация заряженных частиц⁴, изменяется скорость химических реакций и т. д. Подобные процессы в ионосфере именуется 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, вари-

ациям 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 процесса – геокосмической бури⁵. Эффекты, вызванные бурями, проявляются заметнее 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 ТАИМ.

Выше перечислены процессы, ответственные за перенос вещества и излучений “сверху”. Именно они в основном формируют состояние космической погоды. Состояние обычной

⁴Это наблюдается во время отрицательной фазы ионосферной бури. Положительная фаза сопровождается ростом концентрации заряженных частиц.

⁵В литературе геокосмическая буря обычно называется магнитной бурей, что, как видно из нашего определения, не совсем так.

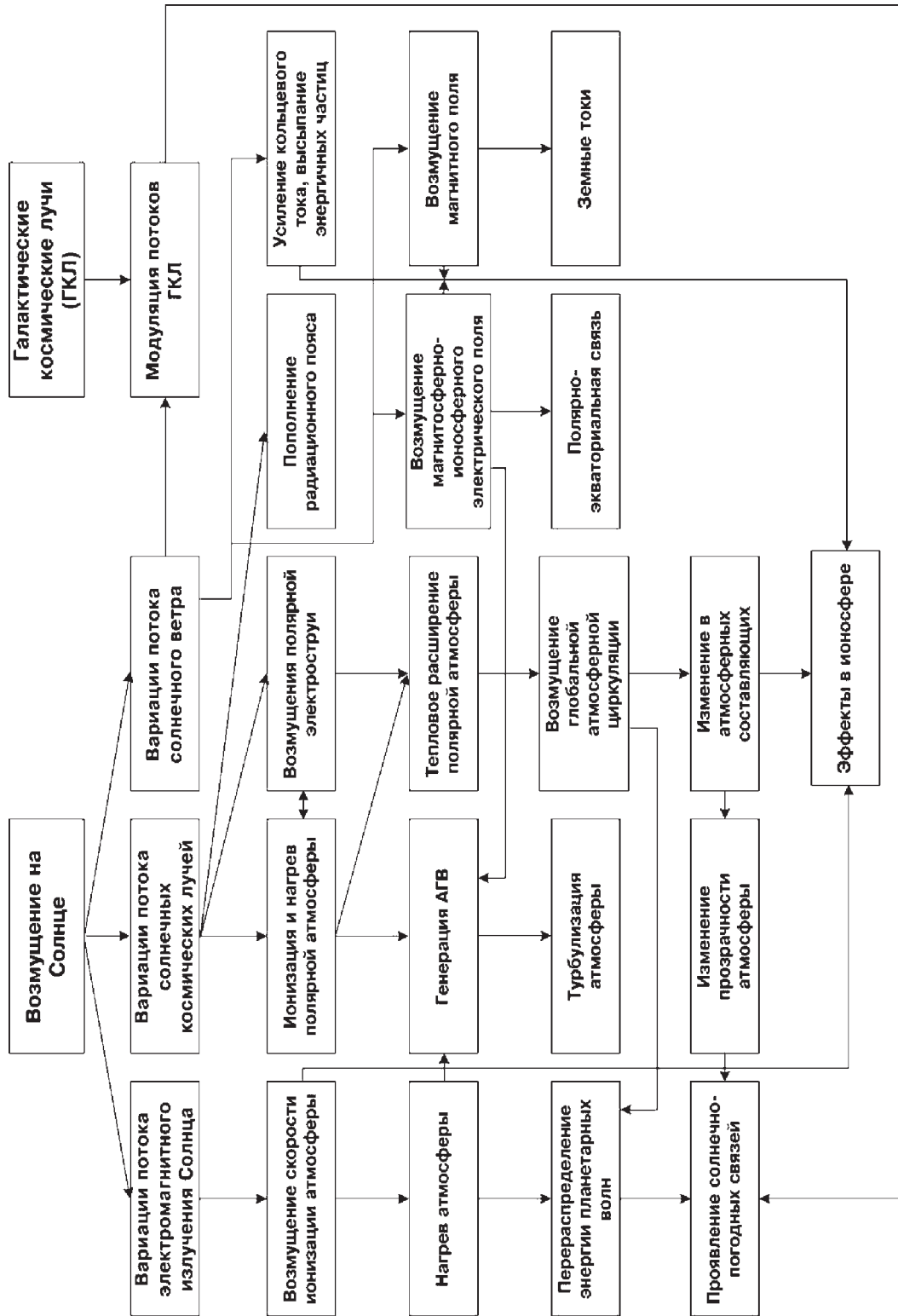


Рис. 2. Схема процессов, сопровождающих геокосмическую бурю

погоды, как известно, определяется преимущественно процессами в системе ОСА (океан – суша – атмосфера) [9]. В определенной степени на погоду влияют процессы на Солнце, однако этот вопрос в настоящее время мало изучен [10]. К нему мы еще вернемся в подразделе 6. 2.

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

В последние десятилетия стало ясно, что на состояние системы ТАИМ 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 [11-13]. Поэтому мощные антропогенные воздействия на подсистемы ТАИМ также должны приниматься во внимание.

Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и в геокосмосе подробно обсуждается в работе автора настоящей статьи [13].

3.3. 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 подсистему других подсистем может быть совместным (синергетическим). Исследование результатов совместного действия является предметом междисциплинарной системы знаний – синергетики [14-15].

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 ТАИМ 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 [16]. 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 $f \approx 0.1 \div 10$ кГц и альвеновским волнам (об этом см. подробнее в подразделе 6. 1).

4. ТАИМ – открытая динамическая нелинейная система

4.1. Общие сведения

ТАИМ относится к открытым системам. В нее 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 сопоставимы.

Потоки энергии, вещества и т. д. изменяются во времени. Их величина зависит от нестационарных процессов на Солнце и внутри Земли. Поэтому система ТАИМ является также динамической. Такие системы удобно описывать уравнениями баланса, которые пред-

Таблица 1. Энергетические характеристики потоков “сверху”

Переносчик	$P_p, \text{Вт/м}^2$	Площадь, м^2	$P, \text{Вт}$	Длительность, с	Примечание
Излучение спокойного Солнца:					
оптическое	1400	$1.3 \cdot 10^{14}$	$1.8 \cdot 10^{17}$	Непрерывно	Длина волны $\lambda \approx 0,4 \div 0,8 \text{ мкм}$
ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское	$\sim 2 \cdot 10^2$	$1.3 \cdot 10^{14}$	$\sim 3 \cdot 10^{16}$		$\lambda \approx 1 \text{ нм} \div 0.4 \text{ мкм}$
жесткое рентгеновское	$\sim 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{14}$	$\sim 10^6$		$\lambda \approx 0.5 \div 1 \text{ нм}$
Излучение возмущенного Солнца:					
оптическое	1400	$1.3 \cdot 10^{14}$	$1.8 \cdot 10^{17}$	$\sim 10^2$	$\lambda \approx 0.4 \div 0.8 \text{ мкм}$
ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское	$\sim 2 \cdot 10^2$	$1.3 \cdot 10^{14}$	$\sim 3 \cdot 10^{16}$	$\sim 10^2$	$\lambda \approx 1 \text{ нм} \div 0.4 \text{ мкм}$
жесткое рентгеновское	$\sim 5 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{14}$	$\sim 6.5 \cdot 10^{10}$	$\sim 10^2$	$\lambda \approx 0.5 \div 1 \text{ нм}$
Солнечные протоны:					
спокойные условия	0.1	10^{16}	10^{15}	Непрерывно	Энергия протонов $10 \div 100 \text{ МэВ}$ Плотность потока $10^{11} \div 10^9 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
возмущенные условия	$2 \div 3$	10^{16}	$(2 \div 3) \cdot 10^{16}$		$10^2 \div 10^5$
Солнечный ветер:					
спокойный	$6 \cdot 10^{-5}$	10^{16}	$6 \cdot 10^{11}$	Непрерывно	$N_p \approx 5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, $v_p \approx 400 \text{ км/с}$
возмущенный	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{16}	$5 \cdot 10^{14}$		$4 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^5$
Галактические космические лучи	10^{-6}	$\sim 10^{14}$	10^8	Непрерывно	Плотность потока $10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, энергия протонов $\epsilon_p = 1 \text{ ГэВ}$
Метеорные потоки:					
фон	$5 \cdot 10^{-7}$	$\sim 10^{14}$	$\sim 5 \cdot 10^7$	Непрерывно	Массы частиц $m \geq 10^{-10} \text{ кг}$ То же
сильнейший дождь	$5 \cdot 10^{-2}$	$\sim 10^{14}$	$\sim 5 \cdot 10^{12}$		
Высыпающиеся высокоэнергичные частицы:					
спокойные условия	10^{-4}	$\sim 10^{13}$	10^9	$10^2 \div 10^4$	Высокие широты То же
возмущенные условия	1	$\sim 10^{13}$	$\sim 10^{13}$	$10^2 \div 10^4$	
Инфракрасное излучение термосферы:					
спокойные условия	$10^{-3} \div 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{11} \div 5 \cdot 10^{12}$	Непрерывно	$\lambda = 2 \div 10 \text{ мкм}$
возмущенные условия	$0.1 \div 1$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{14} \div 5 \cdot 10^{15}$		$10^2 \div 10^4$

Таблица 2. Энергетические характеристики потоков “снизу”

Переносчик	P_p , Вт/м ²	Площадь, м ²	P , Вт	Длительность, с	Примечание
Инфракрасное излучение поверхности Земли	$4 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{17}$	Непрерывно	Погл. 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	$1 \div 10$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{14} \div 5 \cdot 10^{15}$	То же	До высот $\sim 100 \div 120$ км
Внутренние гравитационные волны (ВГВ)	$0.1 \div 1$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{13} \div 5 \cdot 10^{14}$	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	$10^{-4} \div 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{10} \div 5 \cdot 10^{11}$	То же	Достигает F-области ионосферы
Инфразвук от сильнейшего землетрясения	$10^2 \div 10^3$	10^{11}	$10^{13} \div 10^{14}$	10^2	То же
Электромагнитное излучение сильнейшего землетрясения	$10^{-3} \div 10^{-2}$	10^{11}	$10^8 \div 10^9$	$10^2 \div 10^3$	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

ставляют собой законы сохранения энергии, количества теплоты, массы, заряда и т. п. Типичные уравнения баланса для физической величины ρ имеют вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j} = q_{pr} - q_l, \quad (1)$$

где $\vec{j} = \rho \vec{v}$ – плотность потока, \vec{v} – скорость переноса, q_{pr} – скорость производства, q_l – скорость потерь.

В системе ТАИМ 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).

Для описания процессов в системе ТАИМ удобно использовать понятие отрицательной энтропии, называемой негэнтропией (см., например, [17]). 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 около 6000 К, а уходящему из геокосмосферы инфракрасному излучению – температура близкая к 300 К.

Система ТАИМ относится 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 ρ_i имеем нелинейные зависимости:

$$j_i = f(t, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n), \quad 1 \leq i \leq n,$$

$$q_{pri} = \varphi(t, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n),$$

$$q_{li} = F(t, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n).$$

4.2. Свойства системы

Свойства открытых динамических нелинейных систем в корне отличаются от свойств линейных систем (см., например, [18]). Перечислим их кратко.

1. *Сложность процессов, множественность их состояний.* При переходе из одного состояния в другое система испытывает бифуркацию. Важно, что “других” состояний, как предсказывает теория катастроф [19, 20], 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 [21]. 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, к изменению начальных условий. Эта чувствительность получила название бабочкай-эффекта (эффекта бабочки). Впервые он был обнаружен при помощи компьютерного моделирования метеопроцессов в атмосфере Э. Лоренцом (см., например, [18]).

Приведем примеры хаотизации в геокосмосфере. Самым ярким и, безусловно, классическим 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 случайных силы:

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

где \vec{v} – скорость малого объема жидкости или газа, \vec{F} – напряженность поля массовых сил, ν – коэффициент кинематической вязкости, ζ – вторая вязкость, ρ 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 (см. доводы Ю. Л. Климонтовича⁶).

Другим примером детерминированного хаоса является генерация случайно-неоднородной структуры в околоземной плазме в широком диапазоне масштабов – 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 [14, 15]. 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. Система ТАИМ находится в некотором промежуточном состоянии, ей свойственны как процессы деградации, так и про-

цессы самоорганизации. Последняя обеспечивается, как правило, диссипацией энергии, вещества и негэнтропии.

Классическим примером самоорганизации является образование упорядоченной облачной структуры. Подобные структуры в лабораторных условиях называют ячейками Бенара [18].

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 изучения системы как целого 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 системы ТАИМ подробнее.

5. Самоорганизация в системе и ее подсистемах

Самоорганизация предполагает образование упорядоченных или когерентных структур. Такие структуры обнаружены как внутри Земли, так и во всех ее внешних оболочках. Как уже отмечалось, их изучение является предметом синергетики. Общей теории таких систем посвящены многие фундаментальные работы (см., например, [14, 15, 22-27]).

5.1. 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.

К классическим примерам относится также шаровая молния.

⁶Ю. Л. Климонтович. Критерии относительной степени упорядоченности открытых систем. УФН. 1996, **166**, № 11, с. 1231 – 1243.

В последние годы во всех внешних геосферах изучаются упорядоченные структуры – диссипативные солитоны и ударные волны (см., например, [28-32]). Подобные структуры обнаружены в вариациях геомагнитного поля, параметров атмосферы и ионосферы. Как правило, они возникают при значительных энерговыделениях в системе ТАИМ. К ним относятся землетрясения, извержения вулканов, грозы, мощные 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), явление Эль-Ниньо и 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:

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

где Φ_{iNL} – нелинейная функция, ξ_i – случайная функция, $i = 1, \dots, n$. Частным случаем этой системы является хорошо изученная модель, называемая “брюсселятором” [33]:

$$\dot{x}_1 = \Phi_{1NL}(x_1, x_2) + \xi_1(t),$$

$$\dot{x}_2 = \Phi_{2NL}(x_1, x_2).$$

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

Добавим, что в случае пространственно-ограниченных источников в уравнениях вида (2) появляются 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 [34, 35].

В [34] 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 работе [35] описаны обнаруженные квазипериодические когерентные структуры во временных вариациях амплитуд обратно-рассеянных радиосигналов. Величина квазипериода уменьшалась от 15 до 7 с, продолжительность цугов колебаний была $1.5 \div 2$ мин, общая продолжительность существования структур составила около 1.5 ч. Упорядоченные образования наблюдались в диапазоне высот $80 \div 90$ км, причем когерентность лучше выражена для обыкновенной компоненты сигнала. В этот же период времени имело место усиление в $1.5 \div 2$ раза уровня флуктуаций геомагнитного поля в диапазоне периодов $3 \div 600$ с. Геомагнитная активность была повышенной (индекс $A_k \approx 50 \div 60$). По-видимому, наблюдаемые когерентные структуры были вызваны пульсирующими потоками электронов из радиационного пояса с энергиями $40 \div 100$ кэВ, т. е. явились следствием ионосферно-магнитосферного взаимодействия.

Рассмотренные выше примеры в основном относятся к самоорганизации, обусловленной переходом к порядку через флуктуации [22-25]. 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.

5.2. Ударные волны

В простейшем случае они описываются классическим уравнением Бюргерса [36, 37]:

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

где v – искомая функция, $v_t = \partial v / \partial t$,

$v_x = \partial v / \partial x$, ν – 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 $|v v_x| = |\nu v_{xx}|$ ширина фронта ударной волны $\xi_0 \approx \nu / u$.

5.3. Нелинейные волны

Приведем еще один 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 двухпоточковая неустойчивость. Это приводит к усилению неоднородностей N и к их движению со скоростью u в направлении, перпендикулярном вектору геомагнитного поля \vec{B} [38, 39]. 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, m_i – масса ионов, k – постоянная Больцмана, ν_e – частота соударений электронов, ω_B и ω_{Bi} – циклическая гирочастота электронов и ионов соответственно; 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 $\Delta N \approx N_0$ 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 волн $v_0 \ll 1$ и $u \approx v_e$. В экспериментах найдено, что $u \approx c_{si}$ [40]. Это означает, что волны были действительно нелинейными.

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

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

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

Общим вопросам теории нелинейных волн посвящены монографии [36, 37, 41].

5.4. Солитоны

В результате точной компенсации нелинейного укручения профиля волны дисперсионным расплыванием возникает стационарное образование в виде классического солитона [33, 36, 37]. Его примером на воде служит цунами. Такой солитон может возникать и в атмосфере [42]. Он генерируется при мощном энерговыделении в атмосфере, в частности, при воздействии потоков корпускул и солнечного ветра на геокосмосферу. В этом случае пакет внутренних гравитационных волн (ВГВ-солитон) описывается уравнением

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

где $\alpha = 2(\gamma_a^2 - \gamma_a + 1)/\gamma_a^2$, $\beta = 24H^2 c_s (\gamma_a - 1)^{1/2} / \gamma_a$, $\gamma_a = 1.4$ – отношение удельных теплоемкостей воздуха, 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 , $\xi_0 = 2(\beta/u)^{1/2}$,

$u = \frac{1}{3} \alpha c_s a_s \exp((z - z_0)/2H)$. 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 подтверждается наблюдениями [42].

Системе ТАИМ 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:

$$v_t + v_0 v_x = v v_{xx} + \alpha_s v^2 - \beta_s v, \quad v_0, \alpha_s, \beta_s > 0, \quad (6)$$

где v_0 , α_s и β_s – размерные коэффициенты. Амплитуда v_m солитона определяется балансом 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) [33]. Комбинация уравнений Бюргера (3) и КдВ (5) называется уравнением БКдВ [18]:

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

Оно описывает, в частности, профиль реальной (с дисперсией) ударной волны [18].

Примером процессов самоорганизации в электродинамике приземной атмосферы ($z \leq 10 \div 15$ км) являются результаты исследований [43]. Авторами этой работы развита нелинейная модель, описывающая упорядоченные структуры электрического поля и заряда в атмосфере. В частности, ими получено модифицированное уравнение Бюргера для нахождения нестационарных волновых возмущений заряда конечной амплитуды.

5.5. Нелинейные структуры

Нелинейные структуры во всех подсистемах ТАИМ в последнее время стали объектом пристального исследования. Так, в книге [44] описаны результаты поиска магнитогеодинамических (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 $10 \div 100$ с модулируют параметры ионосферы, вызывая пульсирующие потоки энергичных частиц и пульсирующие полярные сияния, а также генерацию инфразвука с давлением на поверхности Земли $\Delta p(0) \approx 0.1 \div 1$ Па и $\Delta p(0)/p_0(0) \approx 10^{-6} \div 10^{-5}$. При этом в F-области ионосферы $\Delta p/p_0 \approx 0.1 \div 1$. По-видимому, пульсирующими потоками электронов вызваны обнаруженные нами и кратко описанные выше когерентные структуры в верхней части D-области ионосферы (см. также [35]).

В работах [29, 30] 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 осно-

ывались на уравнении Кадомцева – Петвиашвили, которое, как известно, описывает двумерный солитон [33, 44]:

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

где α и β – 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 [45]. Для этого использовались методы нелинейной динамики плазмы в магнитном поле. Авторами [45] предложен механизм возникновения вихревой структуры, получены оценки пороговой энергии, при которой крупномасштабные вихри становятся долгоживущими.

Особый интерес для системы ТАИМ 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 [31]. Механизм их генерации заключается в следующем. В результате тектонических процессов возникают сейсмические волны, которые на границе раздела тектоносфера-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 – $c_r \leq H\omega_{BV}$, где

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

есть частота Брента-Вяйсяля, g – ускорение свободного падения. При $H \approx 10$ км имеем

$c_{r\max} \approx 170$ 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 $N = 10^{11}$ 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 магнетометрами.

5.6. Автоволны

К нелинейным структурам в открытых системах относятся так называемые автоволны [26]. Автоволновые процессы в грозовом облаке описаны в работе [46]. Следует ожидать проявления автоволновых режимов и в других подсистемах системы ТАИМ, 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. Возможно, что благодаря слабым воздействиям осуществляется переход от подготовительной к взрывной фазе суббури в магнитосфере [47].

Таким образом, процессы самоорганизации играют важную роль во всех подсистемах, входящих в систему ТАИМ. Есть основания считать, что и система в целом является самоорганизующейся. Основными функциями при

описании таких систем являются энтропия и негэнтропия. Приток негэнтропии обеспечивает эволюцию 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.

6. 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 равен коэффициенту усиления энергии:

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

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 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.

6.1. Высыпание энергичных частиц из магнитосферы

Захват альвеновских и свистовых волн (далее “волн” или “излучений”) в магнитную силовую трубку, заполненную энергичными ча-

стицами, может приводить к возбуждению циклотронной неустойчивости и стимуляции высыпания заряженных частиц из геомагнитной ловушки [16]. Соответствующая совокупность уравнений (отметим – нелинейных), дополненная источником мощности излучений I_w , подобна системе из [16]:

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

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

где I_n – источник энергичных электронов, v_w^{-1} – время становления плотности энергии волн w , n – число энергичных частиц в магнитной силовой трубке, содержащей источник волн, $\Gamma \approx 2.5 \cdot 10^{-12}$ м²/с и $\gamma \approx 10^{12}$ м³/(Дж·с) – коэффициенты связи (для геомагнитной оболочки $L \approx 2$).

Для расчета Γ , v_w и γ при других значениях L необходимо иметь в виду, что [16]

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

$$\gamma = 0.1 \frac{\omega_B^2}{\epsilon_M}, \quad \epsilon_M = \frac{B^2}{2\mu_0},$$

где ω_B – циклическая гирочастота частиц на соответствующей L -оболочке, N – концентрация электронов холодной плазмы, l – длина силовой линии, $b = L^3 (4 - 3/L)^{1/2}$ пробочное отношение, $R_p \approx 0.3 \div 0.5$ – коэффициент 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, μ_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 облоочки $L \approx 2$ 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 ТАИМ.

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, ε_e – энергия этих частиц, w – плотность энергии волн, L_w – характерная длина в силовой трубке, занимаемая волнами (при длительности импульса τ она равна $v_g \tau$, где v_g групповая скорость волн; при продолжительном воздействии L_w равна длине силовой трубки). Пусть при $t \leq 0$ $I_n = I_{n0}$, $I_w = I_{w0}$, $n = n_0$ и $w = w_0$. Решение системы (7), (8) имеет вид:

$$w_0 = \frac{I_{w0} + I_{wc}}{v_w},$$

$$n_0 = \frac{v_w}{\gamma} \frac{I_{n0}}{I_{w0} + I_{wc}},$$

где $I_{wc} = \Gamma I_{n0} / \gamma$ – критическое значение объемной плотности мощности. При $I_w \ll I_{wc}$ воздействием на систему можно пренебречь, а при $I_w > I_{wc}$ оно становится существенным.

Пусть вначале длительность импульса достаточно мала, так что $\tau \ll \tau_w = v_w^{-1}$, $\tau_n = (\gamma w_\infty)^{-1}$. При этом

$$\Delta w = (I_w - I_{w0}) \tau = \Delta I_w \tau,$$

$$\Delta n = -n_0 \Delta I_w \tau^2,$$

$$K_{tr} = \frac{\gamma n_0 \varepsilon_e}{v_g} \frac{\Delta I_w}{I_w}.$$

Максимальное значение K_{tr} достигается при $I_w \gg I_{w0}$, т. е. $\Delta I_w \approx I_w$:

$$K_{tr \max} = \frac{\gamma n_0 \varepsilon_e}{v_g}.$$

При $n_0 = v_w / \Gamma \approx 4 \cdot 10^{11}$ м²/с ($I_{w0} \rightarrow 0$), $\varepsilon_e \approx 60$ кэВ $\approx 10^{-14}$ Дж и $v_g \approx 3 \cdot 10^7$ м/с имеем $K_{tr \max} \approx 130$.

В случае когда $\tau \gg \tau_w$, $\tau \ll \tau_n$ имеем $w \approx w_\infty$, где w_∞ – стационарное значение w при $t \rightarrow \infty$, а $\Delta n / n_0 \ll 1$. Тогда

$$\Delta n = n_0 \gamma (w_0 - w_\infty) \tau,$$

$$K_{tr} = \frac{n_0 \gamma (w_\infty - w_0) \varepsilon_e}{I_w L_w}.$$

Для $w_\infty \gg w_0$ получим

$$K_{tr \max} \approx \frac{n_0 \gamma w_\infty \varepsilon_e}{I_w L_w} = \frac{n_0 \gamma \varepsilon_e \tau}{L_w}.$$

Поскольку $\tau_w \approx 1$ с, $\tau_n \approx 10 \div 10^3$ с для $w_\infty \approx 10^{-15} \div 10^{-13}$ Дж/м³, при $\tau \approx 10$ с, $L_w \approx 4 \cdot 10^4$ км имеем $K_{tr \max} \approx 10^3$.

В стационарном случае, т. е. при $\tau \gg \tau_n, \tau_w$, справедливы следующие выражения:

$$w_\infty = \frac{I_w + I_{wc}}{v_w},$$

$$n_\infty = \frac{v_w}{\gamma} \frac{I_{n0}}{I_w + I_{wc}},$$

$$|\Delta n| = n_0 - n_\infty = n_0 \frac{\Delta I_w}{I_w + I_{wc}},$$

$$K_{tr} = \frac{n_0 \epsilon_e}{w_\infty L_w} \frac{\Delta I_w}{I_w + I_{wc}}.$$

Отсюда

$$K_{tr \max} \approx \frac{n_0 \epsilon_e}{w_\infty L_w}.$$

При тех же значениях n_0 , w_∞ и L_w получим $K_{tr \max} \approx 10^3 \div 10^5$.

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 $10^2 \div 10^5$ раз превышает энергию первичного возмущения. Энергия свистовых волн, сопровождающих сильнейшую молнию, составляет величину $\sim 10^6$ Дж, а $\tau \sim 1$ с [48]. При этом мощность волн $\sim 10^6$ Вт, $I_w \approx 3 \cdot 10^{-13}$ Вт/м³. Величина $I_{wc} \approx 2.5 \cdot 10^{-15} \div 2.5 \cdot 10^{-13}$ Вт/м³ при потоке частиц от внешнего источника (солнечного ветра) $I_{n0} \approx 10^9 \div 10^{11}$ м⁻²·с⁻¹.

Высыпание энергичных частиц из радиационных поясов – одно из проявлений взаимодействия подсистем в системе ТАИМ. В целом взаимодействие ионосферы с магнитосферой изучается давно и успешно⁷.

6.2. 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 (~ 0.0015), что оно не может напрямую повлиять на мощные тропосферные процессы, ответственные за вариации погоды. С другой стороны, факт наличия упо-

⁷См., например, В. Б. Ляцкий, Ю. П. Мальцев. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. Москва, Наука, 1988, 192 с.

мянутого отклика, само существование которого многие годы было проблематичным, в настоящее время не вызывает сомнения [10].

На сегодняшний день предложено несколько спусковых механизмов, способных объяснить наличие солнечно-погодных связей, – динамический, оптический и электрический [10]. 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 [49-52]. 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 [50]. И лучи, и излучение, проникая глубоко в атмосферу, способствуют образованию ядер конденсации – аэрозолей – и изменяют концентрации малых примесей (особенно NO₂). Увеличение концентрации NO₂ 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 мощности солнечного излучения

$$P_p = \frac{P_s}{\pi} \cos \varphi,$$

где $P_s \approx 1.4 \cdot 10^3$ Вт/м² – солнечная постоянная, φ – географическая широта.

Уменьшение прозрачности атмосферы имеет место в диапазоне широт $55 \div 75^\circ$ (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 $\varphi = 55 \div 75^\circ$. При этом мощность солнечного излучения, падающего на поверхность с 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 η_1 (обычно $\eta_1 \approx 0.4$ [50]). Тогда

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

Оценим далее относительную долю мощности η_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; $\gamma_0 = \alpha \rho_{a0} s$, $\alpha \approx 3 \cdot 10^2$ м²/кг, ρ_{a0} – объемная плотность аэрозолей, s – путь, проходимый солнечными лучами в слое атмосферы с аэрозолями. Обычно $\rho_{a0} \approx 10^{-8}$ кг/м³ (см. [9]). При $s = 10$ км имеем $\gamma_0 \approx 3 \cdot 10^{-2}$.

Усиление солнечной активности приводит к увеличению объемной плотности аэрозолей ρ_a в 2÷4 раза [51]. 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/м³ – 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 ΔP и P_w действительно близки между собой.

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

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

где Δt_a – продолжительность уменьшения прозрачности атмосферы, Δt_{scr} – продолжительность активности СКЛ, Π_{scr} – плотность потока мощности СКЛ. Полагая $\Delta t_a = 3$ суток, $\Delta t_{scr} = 10^2 \div 10^5$ с, $\Pi_{scr} = 2$ Вт/м² (см. табл. 1), получим $K_{tr} = 10 \div 10^4$.

Таким образом, имеет место триггерный эффект. Его продолжительность не превышает $\Delta t_a \approx 3$ суток [51].

Полезно сравнить оцененную выше мощность ΔP с изменением мощности солнечного излучения в результате вариаций солнечной постоянной. Их отношение равно

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

где $k_s = 0.0015$ (см. выше), Δt_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 $K \approx 1.4 \cdot 10^4$. Такие большие значения K поясняют, почему солнечные вспышки не могут напрямую отвечать за солнечно-погодные связи.

Следовательно, прозрачность атмосферы изменяется под действием СКЛ, которые про-

никают в нижнюю атмосферу преимущественно в высоких широтах ($\varphi \approx 55 \div 75^\circ$). Образовавшиеся под действием этих лучей аэрозоли переносятся ветром в более низкие широты. Аэрозоли в тропосфере существуют не более $5 \div 10$ суток [9]. При скорости ветра $5 \div 10$ м/с они переносятся на расстояние $R \approx 2.5 \div 10$ тыс. км. С ростом R их концентрация должна постепенно убывать, а значит, должны уменьшаться $\Delta\gamma$ и ΔP , что и наблюдается в действительности [52].

Электрический механизм. Главная роль в глобальной электрической цепи отводится, по-видимому, грозовым облакам [53]. При рассмотрении данного механизма основным процессом, приводящим к высвобождению накопленной в атмосфере энергии, является конденсация водяных паров на заряженных ядрах в грозовых облаках. Коэффициент триггерности при этом равен

$$K_{tr} = \frac{E_{cl}}{\epsilon_i} = \frac{q_c m_1}{\epsilon_i} = \frac{q_c \rho V_1}{\epsilon_i},$$

где E_{cl} – высвобождаемая при конденсации пара скрытая энергия одного ядра массой m_1 и объемом V_1 , $\rho \approx 10^3$ кг/м³ – плотность воды, ϵ_i – потенциал ионизации молекул воздуха, $q_c \approx 2.6 \cdot 10^6$ Дж/кг – удельная теплота парообразования. При $\epsilon_i \approx 2 \cdot 10^{-18}$ Дж, радиусе капли 1 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 потоков солнечных и космических лучей, обсуждается также в книге [54].

6.3. Ионосфера – триггер магнитосферных возмущений

В работе [55] 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, инжек-

тируя 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.

6.4. Триггерные эффекты приливов

Приливы на Земле, вызванные Луной и Солнцем, по-видимому, могут оказывать влияние на сейсмическую деятельность планеты [56]. Приливные напряжения не превышают $\sigma \approx 3 \cdot 10^4$ Н/м². В то же время при землетрясениях (ЗТ) напряжения достигают $\sigma_q \approx 3 \cdot 10^6 \div 3 \cdot 10^7$ Н/м². Видно, что $\sigma \ll \sigma_q$. Важно, однако, что величина $d\sigma/dt \approx 1$ Н/(м²·с), а $d\sigma_q/dt \approx 4 \cdot 10^{-3}$ Н/(м²·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 σ , и опосредовано, изменяя давление газа в атмосфере. Скорее всего, имеет место синергетическое воздействие.

Таким образом, триггерные процессы свойственны как подсистемам, так и системе ТАИМ в целом. Важно, что коэффициент триггерности может быть большим ($\sim 10 \div 10^3$) и даже исключительно большим ($\sim 10^9 \div 10^{10}$). Существование триггерных эффектов во всех геосферах свидетельствует о принципиальной реализуемости так называемого геофизического оружия (обсуждение этого вопроса выходит за рамки работы).

7. Высокоэнергичные явления в системе ТАИМ

Взаимодействие между подсистемами в системе ТАИМ имеет место и в “спокойных” условиях, но особенно четко оно проявляется при эпизодических значительных энерговыделениях в одной из подсистем. К таким энерговыделениям приводят сильные землетрясения, извержения мощных вулканов, грозы, мощные атмосферные динамические процессы, солнечный терминатор, затмения Солнца, вспышки на Солнце, магнитные бури и другие высоко-

энергичные явления. Исследованию процессов, сопровождающих подобные явления, посвящено большое количество работ (см., например, [3, 4, 7, 8, 57-60]). Рассмотрим некоторые процессы подробнее.

7.1. 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) [13].

Еще в 60-е годы XX века надежно установлено, что сильные ЗТ оказывают влияние на атмосферу и ионосферу [61-64]. Затем было показано, что ЗТ сопровождаются возмущениями магнитосферы, в частности, вариациями геомагнитного поля и высыпанием энергичных частиц из радиационного пояса Земли [65-67]. Интересно, что эффекты во всех подсистемах возникают не только после свершившихся ЗТ, но и на стадии их подготовки [4, 68, 69]. Поэтому в конце минувшего века был поставлен вопрос о разработке систем предупреждения ЗТ с использованием комплекса предвестников во всей системе ТАИМ [70, 71]. Возможность решения сложнейшей проблемы прогнозирования ЗТ представляется реальной, хотя до конца не поняты механизмы генерации предвестников ЗТ в системе ТАИМ и, особенно, в геокосмосфере. По-видимому, за передачу возмущений из литосферы во внешние геосферы ответственны квазистатические электрические [72-76] и магнитные поля, электромагнитные волны в достаточно широком диапазоне частот (табл. 3), а также акустические волны⁸.

⁸Уже после набора настоящей статьи появилась работа В. М. Сорокина, В. М. Чмырева. Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф. Геомагнетизм и аэронавтика, 2002, 42, №6, с. 821-830. (Примечание при корректуре).

Размер очага ЗТ редко превышает $100 \div 1000$ км (или $1 \div 10^\circ$). В то же время размер возмущенной зоны в геокосмосфере, как показали наблюдения на спутниках, имеет три характерных масштаба [70].

Первая зона по широте простирается на ± 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 $\sim 10 \div 10^2$ Гц.

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

Третья зона по широте удалена на ± 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 [77]. Менее изучена роль медленных МГД- и гиротропных волн [78].⁹

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 [11, 12, 79]. Анализ выполнен для ~ 100 ЗТ с магнитудой 6 ÷ 9, имевших место в 80-90-е годы. Подтверждено, что ЗТ вызывали возмущения во всех областях ионосферы и носили крупномасштабный и даже глобальный

⁹Перечень типов волн и их основных характеристик приведен ниже в табл. 10.

Таблица 3. Энергетические характеристики полей сейсмического происхождения

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

характер. Наблюдались как аperiодические, так и квазипериодические процессы. В D-области ионосферы величина квазипериода T составляла 2÷3, 5÷6 мин, в E и F-областях ~5÷10 и 10÷60 мин соответственно. Продолжительность реакции в среднем была около 10, 10÷20 и 20÷60 мин соответственно.

На расстояниях $R \leq 2000 \div 3000$ 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 км/с для E и F-областей. Реже регистрировались процессы с $v \approx 5 \div 6$ и 8÷10 км/с. Неуверенно наблюдались эффекты, которым соответствовало значение $v \sim 10 \div 100$ 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 радиощумов в диапазоне частот ~1 кГц ÷ 1 ГГц [12].

7.2. Вулканизм

Извержение вулканов (ИВ) относится к одному из высокоэнергичных источников, способных существенно повлиять на систему

ТАИМ. 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 $10^{14} \div 10^{15}$ 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 с размерами частиц 0.1÷1 мкм. Попав в стратосферу (высоты 20÷30 км), эти частицы находятся там в течение времени $\Delta t \approx 0.5 \div 3$ года. Запыленная стратосфера способствует поглощению и рассеянию солнечного света, в результате чего поверхность Земли недополучает определенное количество теплоты ΔQ . На Земле наступает “вулканическая зима”. В системе ТАИМ это явление относится к триггерным. Для оценки $K_{tr} = \Delta Q / E_{sp}$ вычислим потенциальную энергию 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 $0.1 \div 1$ мкм, $k_{sp} = M_{sp}/M$, h – средняя высота расположения частиц в стратосфере.

Величина

$$\Delta Q = c_p m_a \Delta T_a,$$

где $c_p \approx 10^3$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, m_a – масса атмосферы, ΔT_a – уменьшение температуры воздуха на Земле и в тропосфере в результате “вулканической зимы”.

Вычислим

$$K_{tr} = \frac{c_p m_a \Delta T_a}{k_{sp} M g h}.$$

Полагая $\Delta T_a = 10$ К, $m_a \approx 5 \cdot 10^{18}$ кг, $k_{sp} = 0.1$, $M = 10^{24}$ кг, $h \approx 25$ км, получим $K_{tr} = 10^6$. Эти данные соответствуют извержению сильнейшего вулкана.

За время $\Delta t \sim 1$ года вулканические частицы практически равномерно распределяются в стратосфере. Объемная плотность частиц при этом составляет

$$\rho_{sp} = \frac{M_{sp}}{V_s} = \frac{M_{sp}}{S_E \Delta z_s},$$

где $S_E \approx 5 \cdot 10^{14}$ м² – площадь поверхности Земли, $\Delta z_s \approx 10$ км – эффективная толщина стратосферного слоя с аэрозолями, V_s – его объем.

Ослабление солнечного излучения описывается соотношением

$$P = P_0 e^{-\gamma_{sp} s}, \quad \gamma_{sp} = \alpha \rho_{sp} s,$$

где α – удельный коэффициент ослабления, s – длина пути в слое, заполненном аэрозолями. Ослабление становится существенным при $\gamma_{sp} \approx 0.1$ и определяющим при $\gamma_{sp} \approx 1$. Исходя из приведенного соотношения, оценим минимальную массу и объем вещества, выброшенного вулканом в атмосферу. Принимая $\alpha \approx 10^2 \div 10^3$ м²/кг,

$s \approx 10$ км, получим $\rho_{sp \min} \approx 10^{-7} \div 10^{-6}$ кг/м³. При диаметре частицы аэрозоля 0.3 мкм ее масса $m_{sp} \approx 10^{-17}$ кг, а концентрация частиц $N_{sp} = \rho_{sp \min} / m_{sp} \approx 10^{10} \div 10^{11}$ м⁻³. При $V_s \approx 5 \cdot 10^{18}$ м³ масса аэрозолей $M_{sp \min} = \rho_{sp \min} V_s \approx 5 \cdot 10^{11} \div 5 \cdot 10^{12}$ кг. Масса выброшенного в атмосферу вулканом вещества на порядок больше, т. е. около $5 \cdot 10^{12} \div 5 \cdot 10^{13}$ кг, а его объем порядка $2 \div 20$ км³. Эти параметры соответствуют извержениям сильнейших вулканов. Для примера укажем, что при извержении вулканов Тамбора (1815 г.) и Кракатау (1883 г.) объемы выброшенного в атмосферу пепла и газов составили около 150 и 18 км³ [100]. Такие извержения вулканов бывают редко (раз в несколько тысяч лет), подобных вулканов единицы. Всего же на суше немного более 800 действующих вулканов [9].

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

7.3. Глобальная грозовая активность

Распространение вызванных молниевыми разрядами электромагнитных сигналов в ионосфере и магнитосфере изучается около 70 лет. Но лишь относительно недавно была понята роль этих сигналов во взаимодействии подсистем в системе ТАИМ.

Одновременно на Земле наблюдается около 2000 гроз и грозовых облаков [48, 53]. Средняя продолжительность электрической активности одного облака составляет около 30 мин. На земном шаре за сутки образуется $\sim 10^5$ грозовых облаков, объем каждого из них ~ 100 км³. При водности облака 3 г/м³ его масса составляет около $3 \cdot 10^8$ кг. Это означает, что при конденсации водяного пара в одном облаке выделяется количество теплоты около $7 \cdot 10^{14}$ Дж, а во всех грозовых облаках – около $7 \cdot 10^{19}$ Дж. Им соответствуют мощности порядка 10^{10} и 10^{15} Вт. Такой энергетики достаточно для изменения циркуляционных процессов в нижней атмосфере, развития циклонов и антициклонов, для генерации АГВ, а значит, и для воздействия на подсистемы ТАИМ.

Кроме такого воздействия, имеет место и электромагнитное воздействие. Энергия и

мощность сильнейшей молнии $\sim 10^{10}$ Дж и 10^{10} Вт. При их количестве ~ 1000 суммарная энергия и мощность молний 10^{13} Дж и 10^{13} Вт. В акустические и электромагнитные волны преобразуется $\sim 0.1\%$ и $0.01 \div 0.1\%$ энергии молнии. Поэтому энергия этих волн, генерированных 1000 молний, составляет около $E_a \approx 10^{10}$ Дж и $E_{em} \approx 10^9 \div 10^{10}$ Дж.

Поток энергии и мощности электромагнитного излучения от сильнейшей молнии на высоте около 100 км составляет $10^{-5} \div 10^{-4}$ Дж/м² и $10^{-5} \div 10^{-4}$ Вт/м².

Разряд молнии вызывает нагрев электронов (на $\sim 10 \div 100\%$) в D-области ионосферы, существенное увеличение электронной концентрации, свечение газа и другие явления, которые активно изучались в конце XX-го века (см., например, [80-82]). Особенно популярными были исследования бьющих вверх молний.

Энергетика гроз столь значительна, что нелинейность подсистем и, в частности, волновода Земля – ионосфера может стать ощутимой (см., например, [83, 84]).

Потоки энергии и мощности электромагнитного излучения от грозных разрядов достаточно велики, чтобы перестроить взаимодействие подсистем в системе ТАИМ, вызвать высыпание частиц из радиационного пояса Земли в атмосферу и последующие вторичные процессы.

7.4. Мощные атмосферные процессы

К ним относятся циклоны (антициклоны), струйные течения, ураганы, смерчи и др. Их энергетика – велика [13]. Например, энергия и мощность циклона достигают значений $10^{19} \div 10^{20}$ Дж и $10^{13} \div 10^{15}$ Вт. Немного уступают по энергетике циклонам ураганы и струйные течения. Смерчи (торнадо) отличаются исключительно высокой концентрацией мощности (~ 100 Вт/м³). 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 ~ 200 и даже 300 км. Так осуществляется связь между подсистемами.

Оценим потоки акустической мощности от атмосферных процессов. Для примера рассмот-

рим движение конвективных ячеек и атмосферную турбулентность.

При характерном размере конвективной ячейки ~ 10 км ее объем $\sim 10^{12}$ м³. Если ее скорость подъема ~ 10 м/с, кинетическая энергия ячейки порядка 10^{14} Дж. Время подъема в нижней атмосфере $\sim 10^3$ с, поэтому мощность процесса $\sim 10^{11}$ Вт. В акустическую энергию E_a преобразуется около 0.1 % кинетической энергии ячейки [85], тогда $E_a \sim 10^{11}$ Дж, а мощность $P_a \sim 10^8$ Вт. Поток акустической мощности на границе нижней атмосферы ~ 1 Вт/м².

Атмосферная турбулентность сопровождается также генерацией шумового акустического излучения. Теория Лайтхилла дает [85]:

$$P_a = k_a \rho \sigma_v^3 V M^5 / l, \quad (9)$$

где $k_a \approx 100$, ρ – плотность воздуха, σ_v – среднее квадратическое значение турбулентной скорости, V – объем вихря с размером l , $M = \sigma_v / c_s$ – число Маха. Пусть на высоте $z \approx 10$ км, где $\rho \approx 0.5$ кг/м³, $c_s = 300$ м/с, скорость ветра $v_w \approx 50$ м/с, $\sigma_v \approx 0.2v_w \approx 10$ м/с, $l = 100$ м. Тогда $P_a \approx 20$ Вт, а плотность потока Π_a у источника $\sim 10^{-3}$ Вт/м². Заметим, что

$$\Pi_a \approx k_a \rho \sigma_v^3 M^5, \quad (10)$$

т. е. не зависит от размеров турбулентных вихрей. И хотя формулы (9), (10), строго говоря, не применимы к таким вихрям как циклон или смерч, можно ожидать, что величина Π_a для них существенно больше, чем 10^{-3} Вт/м², так как им свойственна значительно большая скорость (для циклона до 20 м/с, а для смерча до 100 м/с). Для циклона, по-видимому, $\Pi_a \approx 10^{-2} \div 10^{-1}$ Вт/м², а $P_a \approx 10^{10} \div 10^{12}$ Вт.¹⁰ Важно, что и частота излучения для него порядка $c_s / l \sim 10^{-4} \div 10^{-3}$ Гц, а период $10^3 \div 10^4$ с. Такие периоды свойственны АГВ.

АГВ, генерируемые метеопроцессами, распространяются вверх и достигают верхней атмосферы и ионосферы. Так осуществляется “проецирование” этих процессов на процессы в вы-

¹⁰Более точные расчеты выполнены в работах: И. Н. Дробязко, В. Н. Красильников. Изв. вузов. Радиофизика. 1985, **28**, №11, с. 1357-1365; 1988, **31**, №7, с. 771-777.

шележащих подсистемах. Эти вопросы исследуются уже много лет (см., например, [1, 2])¹¹.

Таким образом, мощные атмосферные процессы должны оказывать влияние на взаимодействие подсистем в системе ТАИМ.

7.5. Солнечный терминатор (СТ)

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. Это означает, что существенно изменяется тепловая энергия атмосферы, нарушается скорость химических реакций, возникает градиент давления и генерируются АГВ. Характерная длительность Δt действия СТ порядка нескольких минут. Например, на границе термосферы ($z \approx 130$ км) при $\Delta T = 10$ К и объеме возмущенной атмосферы V_T имеем [13]:

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

где $v_{ST} \approx 500$ м/с – скорость солнечного терминатора, $R_E \approx 6400$ км – радиус Земли, $H \approx 10$ км – приведенная высота атмосферы. При $\rho \approx 10^{-7}$ кг/м³, $\Delta t \approx 100$ с имеем $\Delta E_T \approx 2 \cdot 10^{13}$ Дж, $P_T = 2 \cdot 10^{11}$ Вт. Плотности потока мощности $\Pi = c_p \rho v_{ST} \Delta T$ и энергии $\Pi_E = \Pi \Delta t$ в горизонтальном направлении составляют около 0.5 Вт/м² и 50 Дж/м². Объемная плотность кинетической энергии газа, движущегося впереди фронта СТ (во фронте ударной волны, так как при $z \leq 150$ км $v_{ST} > c_s$), порядка $\frac{1}{2} \rho v_{ST}^2 \approx 10^{-2}$ Дж/м³. В энергию АГВ преобразуется, по-видимому, около 0.1 % кинетической энергии газа. При этом $\Pi_a \approx \frac{1}{2} \eta_a \rho v_{ST}^3 \approx 2.5 \cdot 10^{-3}$ Вт/м², где $\eta_a \approx 10^{-3}$ – коэффициент преобразования энергии. Плот-

¹¹К современным относятся, в частности, работы: Ю. М. Ямпольский. Сборник тезисов. Вторая Украинская конференция по перспективному космическим исследованиям. Кацивели, Крым, 2002, с. 41; Г. В. Лизунов (там же), с. 60; Н. В. Исаев, В. М. Сорокин, В. М. Чмырев, О. Н. Серебрякова. Геомагнетизм и аэрономия. 2002, 42, №5, с. 670-675. Последняя работа интересна тем, что в ней описаны результаты наблюдения значительного усиления электрического поля в ионосфере, связанного с морскими штормами и тайфунами. (Примечание при корректуре).

ность потока мощности в вертикальном направлении $\sim 10^{-3}$ Вт/м². 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 выпадению энергичных частиц из магнитосферы, к активизации взаимодействия между атмосферой, ионосферой и магнитосферой.

Таким образом, СТ является регулярно действующим высокоэнергичным источником, обеспечивающим изменение параметров взаимодействия подсистем в системе ТАИМ [11, 12, 86, 95, 155].

7.6. 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 околоземной среды, за взаимодействием подсистем в системе ТАИМ.

С привлечением оптического и ряда радиофизических методов нами проведены комплексные исследования динамических процессов в атмосфере и ионосфере в широком диапазоне высот (до 1500 км), сопутствовавших част-

ному (73 %) ЗС 11 августа 1999 г. [87-90]. ЗС вызвало сложный 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 ТАИМ, в частности, они были причиной ионосферно-плазмозферного и ионосферно-магнитосферного взаимодействий.

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 ± 1 мин, что соответствовало коэффициенту турбулентной диффузии около $1 \text{ м}^2/\text{с}$.

Во всех областях ионосферы имело место уменьшение концентрации электронов N на десятки (в D-области до сотни) процентов. 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, выпадением электронов из магнитосферы. Предложен механизм стимуляции выпадений магнитосферных энергичных электронов в атмосферу в течение ЗС и после него [89]. По оценкам, плотность потоков выпадающих частиц с энергиями 40 ÷ 80 кэВ достигала $10^7 \div 10^8 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

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 $2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [90].

Таким образом, ЗС позволило уточнить характер взаимодействия подсистем в системе ТАИМ.

7.7. Солнечные вспышки (СВ)

Во время СВ больше всего изменяется плотность потока рентгеновского излучения ($\lambda < 10 \text{ нм}$), которая достигает значений $\Pi_r \approx 10^{-3} \text{ Вт}/\text{м}^2$. Длительность Δt СВ варьируется от 1 до 30 мин. При $\Delta t \approx 10^3 \text{ с}$ плотность потока энергии рентгеновского диапазона составляет около $1 \text{ Дж}/\text{м}^2$. Под действием рентгеновской вспышки увеличивается скорость ионизации молекул газа на величину порядка¹²

$$\Delta q = \frac{\Pi_r}{\varepsilon_r H},$$

где $\varepsilon_r \approx 2 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}$ – энергия фотона с длиной волны $\lambda = 1 \text{ нм}$. При $H \approx 10 \text{ км}$ имеем $\Delta q \approx 5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. При таких значениях Δq электронная концентрация в E-области возрастает на 10 ÷ 100 %, а в D-области ионосферы – на сотни процентов и более. После этого начинаются вторичные процессы, подобные тем, что имеют место при прохождении СТ (см. выше).

СВ сопровождаются также выбросом высокоэнергичных корпускул (протонов с энергиями $10 \div 10^2 \text{ МэВ}$). 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 ТАИМ.

Потоки электронов с энергиями $\varepsilon_e \approx 1 \div 30 \text{ кэВ}$ и плотностью Π_e в авроральной области вызывают существенный рост N соответственно на высотах 140 ÷ 90 км. При этом

$$\Delta q \approx \frac{\Pi_e \varepsilon_e}{2H \varepsilon_i}, \quad \frac{N}{N_0} = \sqrt{1 + \frac{\Delta q}{q_0}}, \quad (11)$$

¹²Здесь для простоты пренебрегается поглощением солнечного излучения в атмосфере и считается, что зенитный угол равен нулю градусов. Вычисленное таким образом значение Δq представляет собой оценку сверху.

где $\varepsilon_i \approx 35$ эВ – энергия, затрачиваемая на один акт ионизации молекул корпускулами; $q_0 = \alpha_{r0} N_0^2$ – скорость образования электронов в невозмущенных условиях, α_{r0} – коэффициент рекомбинации электронов. При сильных потоках электронов $\Delta q \gg q_0$,

$$N \approx \sqrt{\frac{\Pi_e \varepsilon_e}{2H\alpha_{r0} \varepsilon_i}}. \quad (12)$$

Например, при $\varepsilon_e \approx 35$ кэВ, $\Pi_e = 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $\alpha_{r0} \approx 2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ имеем $N = 5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. В естественных условиях на высоте около 90 км $N_0 \approx 10^{10} \text{ м}^{-3}$ днем и на порядок меньше ночью. Таким образом, авроральные электроны способны увеличить N на несколько (2÷3) порядков, а значит инициировать описанный выше механизм ионосферно-магнитосферного взаимодействия. Эти частицы приводят также к заметному нагреву атмосферы. Температура газа увеличивается на величину

$$\Delta T_a \approx \frac{\Pi_e \varepsilon_e \Delta t}{c_p \rho H}. \quad (13)$$

Например, при $\Pi_e = 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $\varepsilon_e \approx 30$ кэВ, $\Delta t = 2 \cdot 10^4$ с на высотах 100 и 120 км ΔT_a составляет 10 и 100 К соответственно. Такие

вариации ΔT_a вызывают генерацию АГВ, распространяющихся преимущественно из высоких широт к экватору¹³.

7.8. Геокосмические бури (ГБ)

Нестационарные потоки солнечного ветра, выбросы коронального вещества вызывают самую значительную перестройку процессов в системе ТАИМ. Схема основных процессов показана на рис. 2. Наиболее геоэффективными выбросами корональной массы являются магнитные облака, которые приводят к сильным магнитным бурям ($\Delta B > 100$ нТл) [91-93]. Для магнитного облака значения потоков мощности Π_p могут достигать $3 \cdot 10^{-4}$ и $3 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}^2$ для магнитной и кинетической энергий соответственно. Сами энергии при этом составляют 10^{17} и 10^{20} Дж, мощности приближаются к значениям $3 \cdot 10^{12}$ и $3 \cdot 10^{14} \text{ Вт}$.

Геокосмическая буря, как уже отмечалось, представляет собой совокупность магнитной, ионосферной, атмосферной и, вообще говоря, электрической бурь. Их энергетика – велика (табл. 4, см. также [13]).

¹³См. также работу: L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, V. I. Taran, O. F. Tyrnov. XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, Programme, poster presentations Maastricht Exhibition and Congress Center (MECC), Maastricht the Netherlands. 17-24 august 2002. P. 2279.

Таблица 4. Энергетические характеристики геокосмической бури

Область геокосмоса	Энергия, Дж	Мощность, Вт	Продолжительность, с	Относительное изменение энергии	Примечание
Магнитосфера	10^{16}	10^{12}	10^4	10^{-2}	Энергия магнитного поля
Ионосфера	10^{12}	10^8	10^4	± 1	Тепловая энергия
Термосфера	10^{15}	$10^{10} \div 10^{11}$	$10^4 \div 10^5$	10^{-3}	Тепловая энергия

Энергию магнитной бури (МБ) можно оценить по возмущению индукции геомагнитного поля B . Поскольку 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 ΔB достигают $0.02B_0$, максимальная энергия МБ не превышает $3 \cdot 10^{16}$ Дж (табл. 5, табл. 6).

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 значению $\Pi_e = 3 \cdot 10^{13}$ м⁻²·с⁻¹. При площади каспа

10^{12} м² и продолжительности высыпаний $\Delta t \approx 10^4$ с получаем мощность $\sim 10^9$ Вт и энергию $\sim 10^{13}$ Дж. Высыпаящиеся электроны производят дополнительную ионизацию и нагрев атмосферы в области каспа. Согласно соотношениям (11), (12) и (13) на высотах $z \approx 200 \div 300$ км $\Delta q \sim 10^9$ м⁻³·с⁻¹, N увеличивается на сотни процентов, температура газа – на десятки – сотню кельвинов. При оценках ΔT_a полагалось, что характерное время теплопроводности $5 \cdot 10^2 \div 4 \cdot 10^3$ с для $z \approx 300 \div 200$ км соответственно. При этом активно генерируются сильные (нелинейные) АГВ. Последние распространяются в основном в направлении к экватору, приобретая пилообразный профиль (см., например, [86]). Нагрев термосферы обуславливает изменение циркуляции и скоростей химических реакций и, в частности, увеличение отношения концентраций O и N₂. Все это способствует возникновению положительной фазы ионосферных бурь (см., например, [94]).

Таблица 5. Характеристики магнитной бури (ориентировочные значения)

К-индекс	ΔB , нТл	Δt , ч	ΔE_M , Дж	P_M , Вт	Качественная характеристика
0	2.5	1.0	$1.3 \cdot 10^{14}$	$3.7 \cdot 10^{10}$	Крайне слабая
1	5	1.4	$2.7 \cdot 10^{14}$	$5.4 \cdot 10^{10}$	Сверхслабая
2	10	1.6	$5.3 \cdot 10^{14}$	$9.3 \cdot 10^{10}$	Очень слабая
3	20	1.8	$1.1 \cdot 10^{15}$	$1.6 \cdot 10^{11}$	Слабая
4	40	2.0	$2.1 \cdot 10^{15}$	$3.0 \cdot 10^{11}$	Весьма умеренная
5	70	2.5	$3.4 \cdot 10^{15}$	$3.8 \cdot 10^{11}$	Умеренная
6	120	3.0	$6.4 \cdot 10^{15}$	$5.9 \cdot 10^{11}$	Сильная
7	200	4.0	$1.1 \cdot 10^{16}$	$7.4 \cdot 10^{11}$	Очень сильная
8	330	5.0	$1.8 \cdot 10^{16}$	$9.7 \cdot 10^{11}$	Сверхсильная
9	500	6.0	$2.7 \cdot 10^{16}$	$1.3 \cdot 10^{12}$	Крайне сильная

Таблица 6. Характеристики фаз крайне сильной магнитной бури

Фаза	Начальная	Основная	Восстановительная
Δt , ч	2	6	24
ΔB , нТл	20	500	400
ΔE_M , Дж	$1.1 \cdot 10^{15}$	$2.7 \cdot 10^{16}$	$2.2 \cdot 10^{16}$
P_M , Вт	$1.5 \cdot 10^{11}$	$1.25 \cdot 10^{12}$	$2.5 \cdot 10^{11}$

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 ΔB , т. е. собственно МБ, активизируется высыпание авроральных электронов, возрастает N , усиливается джоулев нагрев плазмы в авроральной ионосфере, возмущаются термосферная циркуляция и скорости химических реакций. Подъем ионосферной плазмы ответствен за отрицательную фазу ионосферной бури.

По окончании МБ возникают эффекты последствия, природа которых до конца не установлена (см., например, [94]). Наиболее яркий из них – среднеширотное высыпание релятивистских электронов, энергия и плотность потока которых достигает значений ~ 1 МэВ и 10^9 м⁻²·с⁻¹. При этом на высотах $z \geq 40$ км значительно увеличиваются Δq и N . Например, при $\Pi_e = 10^9$ м⁻²·с⁻¹ ($\Pi_p = 1.6 \cdot 10^4$ Вт/м²) получим $\Delta q \approx 2 \cdot 10^9$ м⁻³·с⁻¹, $N \approx 10^{10}$ м⁻³ на высотах 40 ÷ 60 км. Если высыпание электронов имеет место на площади $3 \cdot 10^{14}$ м², то суммарные мощность и энергия этого процесса порядка $5 \cdot 10^{10}$ Вт и $5 \cdot 10^{15} \div 5 \cdot 10^{16}$ Дж (при продолжительности высыпаний 1 ÷ 10 суток). Энергетика высыпающихся электронов сопоставима с энергетикой умеренной или сильной МБ (табл. 5).

Многие из описанных эффектов геокосмических бурь наблюдались нами в среднеширотной ионосфере [11, 12, 95].

7.9. Метеорные потоки

Роль метеорных потоков в системе ТАИМ, конечно, не может сравниться с ролью возмущений солнечного ветра. Однако при определенных условиях метеорные потоки могут приводить к заметным возмущениям атмосферы и ионосферы на высотах $z \sim 50 \div 120$ км. Ранее в основном изучались процессы, вызванные отдельными метеорами (см., например, [96]). Хорошо известно, что метеор способен создавать сильные кратковременные и локализованные возмущения. Для изучения процессов в системе ТАИМ 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.

Приведем результаты наших оценок усредненных эффектов (табл. 7). При расчетах предполагалось, что фоновый поток метеоров описывается известным законом [97]

$$\Pi_m = \frac{A_m}{m_m^{\gamma_m}},$$

где $A_m = 10^{-18.85}$ (в системе СИ), $\gamma_m = 1.25$. Этот эмпирический закон установлен для масс метеоров $m_m = 10^{-9} \div 10^{-1}$ кг. Далее, закон применялся в диапазоне масс $10^{-10} \div 1$ кг. Считалось также, что скорость метеоров равна 70 км/с, коэф-

Таблица 7. Усредненные эффекты метеорных потоков (в ночной нижней E-области $N = 2 \cdot 10^9$ м⁻³, эффективный коэффициент рекомбинации $3 \cdot 10^{-13}$ м³·с⁻¹, Π_m – плотность потока частиц с массой не менее 10^{-10} кг, Δt – приток массы метеорного вещества)

Метеорный источник	Δt , с	Π_m , м ⁻² ·с ⁻¹	Π_p , Вт·м ⁻²	Π_a , Вт·м ⁻²	Δq , м ⁻³ ·с ⁻¹	ΔN , м ⁻³	Δm , кг	ΔT , 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

фициент преобразования кинетической энергии в акустическую (в энергию АГВ) порядка 1 %.

Оказалось, что плотность потока массы метеорного вещества пропорциональна $m_{\min}^{1-\gamma_m}$ (это же справедливо для плотности потока кинетической энергии). В то же время изменение скорости ионизации $\Delta q \sim m_{\min}^{2/3-\gamma_m}$. Эти эффекты определялись в основном потоком частиц с $m_{\min} = 10^{-10} \div 10^{-9}$ кг. Из табл. 7 следует, что метеорный фон в среднем создает лишь очень незначительные возмущения в E-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 E-области ионосферы в десятки – тысячи раз днем и ночью соответственно. Продолжительность этого процесса, однако, не превышает 15 мин.

Плотность потока мощности излучения акустических волн и АГВ становится ощутимой лишь при выпадении сильнейшего метеорного дождя.

Естественно, метеорные потоки могут непосредственно заплыть верхнюю атмосферу и вызывать оптические эффекты, подобные тем, что имеют место при извержениях вулканов.

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

К совсем другим по величине эффектам приведет падение крупных космических тел. Эти эффекты рассматриваются, например, в работах [98-100].

Таким образом, явления, связанные со значительным энерговыделением в системе ТАИМ, приводят к перестройке взаимодействия всех ее подсистем, к нелинейности процессов, срабатыванию триггерных механизмов высвобождения энергии, к эффектам “последствия” и т. п.

8. Активные эксперименты в системе ТАИМ

Активные эксперименты (АЭ) оказались удобными для изучения как системы ТАИМ в целом, так и взаимодействия ее подсистем. При этом становится возможным дозировать

величину энерговыделения, выбирать для него место и время, что обычно не возможно при исследовании естественных процессов в системе ТАИМ [11, 12]. Перечень источников, используемых в АЭ, и их основные параметры приведены в работах [11-13]. Ниже рассмотрим только некоторые из них.

8.1. Мощное радиоизлучение

Этот источник весьма удобен для проведения АЭ, поскольку он оказывает только электромагнитное воздействие на плазму и является экологически чистым. Воздействию мощного радиоизлучения (МР) на ионосферную и магнитосферную плазму посвящено большое количество работ (см., например, [101-104]).

Воздействуя МР на ионосферу и магнитосферу, можно существенно влиять на процессы в системе ТАИМ и в ее подсистемах. Для этой цели пригодны радиотехнические установки, излучающие в диапазоне от ~ 1 кГц до ~ 1 ГГц [35, 105]. Однако есть предпочтительные диапазоны радиоволн. К ним относятся следующие: 1) $f \approx 10 \div 100$ кГц (гирорезонанс для волны необыкновенной поляризации в магнитосфере), 2) $f \approx 1.5$ МГц (гирорезонанс для волны необыкновенной поляризации в нижней ионосфере), 3) $f \approx 3 \div 10$ МГц (верхний гибридный резонанс (ВГР) в F-области ионосферы).

Рассмотрим эффекты воздействия МР подробнее.

Описываемые эффекты базируются на построенной нами численной модели взаимодействия МР с ионосферной и магнитосферной плазмой. Расчеты выполнены для широкого диапазона эффективных мощностей, включая значения, близкие к предельным [35]. В качестве исходных использовались уравнения баланса температуры электронов, концентрации электронов N , положительных и отрицательных ионов N^\pm , а также укороченное уравнение для электрического поля радиоволны. Данные моделирования соответствовали результатам экспериментов, проведенных нами в средних и высоких широтах [106-108], а также результатам других исследователей (см., например, [104] и ссылки там).

ОНЧ-нагрев. Значительное внимание уделялось взаимодействию мощного ОНЧ-излучения с магнитосферной плазмой (см., например, [103] и ссылки там). При этом, как правило, $f \approx f_B$, т. е. рассматривалось резонансное циклотронное взаимодействие магнитосферных электронов с радиоволной. Условие резонанса выполняется в ограниченной области пространства. Здесь имеет место когерентное взаимодействие волн, генерация циклотронной неустойчивости, турбулизация и нагрев плазмы. Вследствие значительной теплопроводности электронного газа, постепенно нагревается вся силовая трубка, включающая возмущенный объем плазмы, и величина возмущений становится достаточно малой. Для резонансного воздействия дос-

таточно поглощаемой мощности радиоволны $P_{ab} \sim 0.1 \div 1$ МВт.

В работах [109, 110] кратко описаны результаты расчета омического нагрева электронов в ионосфере и магнитосфере при нерезонансном взаимодействии радиоволн необыкновенной поляризации с частотами $f \sim 1$ кГц \div 1 МГц. Показано, что в дневное время при $P_{ab} = 10$ МВт и при использовании оптимальной частоты $f_o \sim 10$ кГц увеличение температуры электронов $\Delta T_e \sim 10^3$ К в магнитосфере и $\sim 0.1 \div 10$ К в ионосфере. В ночное время $f_o \sim 0.1$ МГц, а $\Delta T_e \sim 10^3$ К в нижней части ионосферы и $\sim 100 \div 300$ К в средней и внешней ионосфере, а также в магнитосфере (табл. 8). Тепловые возмуще-

Таблица 8. Результаты расчета величины нагрева электронов ΔT_e для различных областей геокосмосферы ($L=2$)

f , кГц	z , км	ΔT_e , К (день)	ΔT_e , К (ночь)	Примечание
1	75	0.3	10	Коэффициент прохождения $k_1 = 0.1$; фактор нелинейного поглощения $k_2 \approx 1$ ночью и $k_2 \approx 0.3 \div 0.7$ днем
	110	$3 \cdot 10^{-3}$	0.2	
	300	$3 \cdot 10^{-3}$	0.1	
	1000	$2 \cdot 10^{-2}$	0.1	
	6400	3	1	
10	75	15	150	$k_1 = 0.1$; $k_2 \approx 0.95 \div 0.98$ ночью и $k_2 \approx 0.1 \div 0.5$ днем
	110	0.1	30	
	300	0.2	1	
	1000	2	10	
	6400	10^3	100	
100	75	80	700	$k_1 = 0.4$; $k_2 \approx 0.92 \div 0.98$ ночью и $k_2 \approx 10^{-3} \div 0.2$ днем
	110	0.4	250	
	300	0.1	30	
	1000	0.2	300	
	6400	30	$4 \cdot 10^3$	
1000	75	Пренебрежимо мала	$2.5 \cdot 10^3$	$k_1 = 1$ ночью и $k_1 = 0.4$ днем; $k_2 \approx 4 \cdot 10^{-3} \div 1$ ночью. Существенно самовоздействие радиоволны
	110		$4.1 \cdot 10^3$	
	300		10^2	
	1000		$3.4 \cdot 10^2$	
	6400		10^2	

ния носят нестационарный характер (характерное время $\sim 10^3$ с). Это обусловлено существенным различием времени становления ΔT_e и N . Вначале нагревается ионосфера (за время $10^{-2} \div 10^2$ с соответственно на высотах $60 \div 1000$ км) и вершина магнитной силовой трубки (за время $\sim 10^3$ с). Затем часть тепла распространяется от вершины трубки к ее основанию ($z \sim 1000$ км). Время распространения зависит от длины силовой линии и составляет не менее нескольких тысяч секунд.

Нагрев плазмы вызывает рост концентрации электронов в нижней части ионосферы (до десятков процентов) и ее уменьшение на высотах $z \geq 200 \div 250$ км (тоже до десятков процентов).

Описанные первичные процессы приводят к изменению параметров подсистем, нарушению их взаимодействия и к появлению вторичных процессов (модуляции ионосферных токов, генерации электромагнитных полей, высыпанию энергичных электронов из магнитосферы и др.).

Гирорезонансный нагрев. Изложим кратко результаты моделирования взаимодействия МР на гирочастоте электронов с плазмой нижней ионосферы. Процесс нагрева электронов является нестационарным. Сначала (при $t \leq 0.1 \div 1$ с) T_e увеличивается и достигает первого квазистационарного значения. При этом $N \approx N_0$. Затем начинается уменьшение N , обусловленное активизацией процесса прилипания электронов, уменьшается поглощение радиоволны и T_e возрастает, а при $t \sim 1 \div 10$ с достигает второго квазистационарного значения. Однако при $t > 10 \div 10^2$ с T_e уже начинает уменьшаться из-за роста N в результате замедления процесса рекомбинации электронов и роста нелинейного поглощения радиоволны. При $t \approx 10^4$ с T_e принимает стационарное значение.

Профиль $\Delta T_e(z)$ имеет максимум в D-области ионосферы. Здесь величина $\Delta T_e/T_{e0}$ достигает гигантских значений, близких к $50 \div 60$ при $PG = 10$ ГВт (P – мощность радиопередающего устройства, G – коэффициент усиления антенны). Высота максимума ΔT_e увеличивается от $70 \div 78$ км до $80 \div 85$ км

днем и ночью соответственно. Интересно, что при $PG \approx 0.1 \div 10$ ГВт оба стационарных уровня ΔT_e сливаются в один. В ночное время величина ΔT_e несколько больше, чем днем, однако N при этом крайне незначительна.

Процесс возмущения N и N^\pm также нестационарен. Сначала N уменьшается на десятки процентов и через $1 \div 50$ с достигает квазистационарного значения. Стационарное состояние с $N > N_0$ достигается спустя $10^2 \div 10^4$ с.

Минимальное возмущение N имеет место при $z = 70 \div 50$ км днем и $z = 75 \div 50$ км ночью для $PG = 0.1 \div 10$ ГВт соответственно. Максимальное возмущение N возникает на высотах $70 \div 80$ км для дня и ночи и зависит от PG . От эффективной мощности также зависит характер возмущений N . Во-первых, с ростом PG увеличиваются значения N_{\min} (для $PG < 1$ ГВт) и N_{\max} , первое из них составляет $(0.9 \div 0.7)N_0$, а второе – около $(1.04 \div 6)N_0$ для $PG \approx 1 \div 10^3$ МВт. Во-вторых, при $PG \approx 0.1 \div 10$ ГВт ожидается подавление процесса прилипания электронов и $N \approx N_0$. В-третьих, при $PG \geq 1$ ГВт появляются две области с увеличенными значениями N . Первая возникает через ~ 0.01 с и со временем перемещается вверх, а вторая – через $\sim 10^2$ с и движется вниз. Примерно через 10^4 с обе области сливаются в одну. При этом $N/N_0 \approx 5 \div 6$ для $PG = 1 \div 10$ ГВт.

Резонансный нагрев. Рассмотрим возмущения ионосферной плазмы декаметровыми радиоволнами обыкновенной поляризации. Волна отражается на высоте, где плазменная частота $f_p = f$. На уровне, где плазменная частота равна $(f^2 - f_B^2)^{1/2}$, имеет место ВГР [111]. Вертикально падающая волна накачки, рассеиваясь на затравочных неоднородностях электронной концентрации, передает свою энергию медленным плазменным волнам. Неоднородности N усиливаются, и увеличивается интенсивность рассеянной волны. В результате этого развивается тепловая параметрическая неустойчивость, энергия волны накачки диссипирует, а плазма нагревается. Такая диссипация получила название аномального поглощения. Около 86 % дошедшей до уровня

ВГР энергии поглощается в слое плазмы толщиной $2L_a$. Можно показать, что максимальное значение L_a достигает величины:

$$L_a = \frac{e}{\pi^2} \frac{c}{f} \left(\frac{\delta N}{N} \right)^{-2} \left(\frac{f_B}{f} \right)^{5/2},$$

где $e \approx 2.71828$, $\delta N/N \approx 10^{-2}$ – относительная концентрация электронов в неоднородности. Важно, что $L_a \sim f^{-7/2}$. При $f \approx 3 \div 10$ МГц $L_a \approx 70 \div 1$ км соответственно.

Величина нагрева электронов $\theta = T_e/T_{e0}$ существенно зависит от времени суток и ориентации диаграммы направленности по отношению к геомагнитному полю. При вертикальном зондировании для низких и средних, а также высоких широт величину θ можно оценить соответственно из соотношений:

$$\theta^{-3/2} (\theta - 1) \frac{L_{\perp} \sin \alpha + 2L_{T0} \theta^2}{L_{\perp} \sin \alpha + 2L_{T0}} = \frac{\Pi_{ab}}{\Pi_{c1}}, \quad (14)$$

$$\theta^{-3/2} (\theta - 1) \frac{L_a + L_{T0} \theta^2}{L_a + L_{T0}} = \frac{\Pi_{ab}}{\Pi_{c2}}, \quad (15)$$

где $L_{\perp} \approx z \Delta \alpha$, $\Delta \alpha$ – ширина диаграммы направленности антенны; $L_{T0} = (\kappa_{e0} t_{T0})^{1/2}$ – масштаб теплопроводности, κ_{e0} – коэффициент температуропроводности, $t_{T0} = (\delta_0 v_0)^{-1}$ – время становления T_e , v_0 – частота соударений электронов с ионами, $\delta_0 \approx 10^{-4}$ – относительная доля энергии, теряемая при одном соударении; $\Pi_{ab} = \eta_{ab} PG / 4\pi z^2$ – плотность потока поглощаемой мощности радиоволны на высоте z ,

η_{ab} – коэффициент, учитывающий потери мощности вне области аномального поглощения волны; α – угол между волновым вектором и \vec{B}_0 ; $\Pi_{c1,2}$ – критическая плотность потока, служащая мерой степени нагрева электронов (индекс 1 соответствует низким и средним широтам, а индекс 2 – высоким широтам). При $N \approx N_0$ имеем

$$\Pi_{c1} \approx 2\epsilon_{e0} N_0 L_a t_{T0}^{-1} (\sin \alpha + 2L_{T0}/L_{\perp}),$$

$$\Pi_{c2} \approx 2\epsilon_{e0} N_0 (L_a + L_{T0}) t_{T0}^{-1},$$

где $\epsilon_{e0} = 3kT_{e0}/2$ – тепловая энергия электрона. В уравнениях (14), (15) учтено, что потери тепла, связанные с соударениями электронов и их теплопроводностью, примерно равны. Кроме того, считалось, что длительность воздействия τ намного больше времени нагрева электронов $t_T = t_{T0} \theta^2$ ($1 \div 2$ мин), но меньше времени диффузии плазмы $t_D = L_D^2/D_a$, где L_D характерный масштаб диффузии, D_a – коэффициент амбиполярной диффузии. Обычно на высотах $300 \div 350$ км $t_D \approx 15 \div 5$ мин соответственно.

Для обеспечения $\theta = 2$ потребуются потоки Π_{ab} , результаты оценок которых приведены в табл. 9. Считалось, что $G = 185$, $\eta_{ab} \approx 0.7$ и 0.1 ночью и днем. Из табл. 9 видно, что значения Π_{ab} в ночное время слабо зависят от широты и составляют около 10^{-5} Вт/м². В дневное время Π_{ab} примерно равны 10^{-5} и $3 \cdot 10^{-4}$ Вт/м² для низких и высоких широт соответственно. В первом случае $PG \approx 10 \div 15$ МВт, а во втором – около 100 и 5600 МВт. Это означает, что большие возмущения T_e , а при $\tau \geq t_D$ и N , легко достигаются в ночное время

Таблица 9. Требуемые значения плотности потока поглощаемой мощности и эффективной мощности радиосистемы для увеличения температуры электронов в области ВГР в два раза

Широты	Время суток	f , МГц	Π_c , Вт/м ²	Π_{ab} , Вт/м ²	PG , МВт	N_0 , м ⁻³	T_{e0} , К
Низкие ($\alpha = \pi/2$)	Ночь	3.2	$2.6 \cdot 10^{-5}$	$8.5 \cdot 10^{-6}$	14	10^{11}	800
	День	10	$2.4 \cdot 10^{-5}$	$9.3 \cdot 10^{-6}$	110	$1.1 \cdot 10^{12}$	2000
Высокие ($\alpha = 0$)	Ночь	3.2	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$7.5 \cdot 10^{-6}$	12	10^{11}	800
	День	10	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$3.4 \cdot 10^{-4}$	5600	$1.1 \cdot 10^{12}$	2000

и затруднены или невозможны при существующих энергетических потенциалах радиосистем в дневное время.

Например, в условиях низкоширотной ионосферы, при $f = 3.175$ МГц и сравнительно небольшом значении $PG = 60$ МВт наши оценки дают, что в ночное время $\theta \approx 3$. В работе [112] действительно обнаружены такие значительные возмущения температуры электронов ($T_{e0} \approx 800$ К, $T_e = 2400$ К). Нагрев вызвал также вытеснение плазмы на высотах $250 \div 400$ км, при этом N уменьшалось до $N_{\min} \approx 0.3N_0$.

Сильный нагрев электронов в ночное время приводит к генерации и распространению из низкоширотной ионосферы тепловой волны с резким градиентом температуры T_e на ее переднем фронте [111]. Скорость этой волны можно оценить по формуле:

$$u = \frac{\Pi_{ab}}{\Pi_c} \frac{L_a}{(\theta - 1)t_c} = \frac{\Pi_{ab}}{\Pi_c} \frac{L_a \theta^{5/2}}{(\theta - 1)t_{c0}},$$

где $t_c = t_{c0} \theta^{5/2}$ – время становления T_e за счет теплопроводности. Для ночных условий при $\Pi_{ab}/\Pi_c \approx 1.5 \div 2.4$, $t_{c0} \approx 60$ с, $L_a = 60$ км имеем $\theta \approx 3 \div 4$ и $u \approx 10 \div 20$ км/с. Такое значение u соответствует результатам численных расчетов [111].

Вытеснение плазмы из нагретой области приведет к “продавливанию” ночной ионосферы мощным радиоизлучением и опустошению плазмосферы, а также к генерации уединенной нелинейной ионно-звуковой волны сжатия с $N > N_0$. Ее скорость равна [111]:

$$v(N) = c_{si} (1 + \ln N/N_0),$$

где $c_{si} = \sqrt{k(T_e + T_i)/m_i}$. В плазмосфере $c_{si} \approx 5$ км/с, а $v(N) \approx 10$ км/с при $N/N_0 \approx 3$.

В дневных условиях в F-области ионосферы $\Delta T_e/T_{e0} \approx 0.2 \div 0.3$, а $N/N_0 \approx 0.9$, поэтому описанные выше эффекты отсутствуют [111]. Днем главным процессом является увеличение плотности потока плазмы из

ионосферы в плазмосферу от $5 \cdot 10^{11}$ до $2 \cdot 10^{12}$ м⁻²·с⁻¹ и значительное обогащение последней [111].

В условиях среднеширотной ионосферы эффекты в целом подобны, но есть и отличия, связанные со значительной длиной магнитной силовой трубки [113]. Во-первых, в плазмосфере не ожидается появление тепловой волны, достигающей магнитосопряженной ионосферы даже при $PG = 1000$ МВт. Во-вторых, время распространения ионно-звуковой волны сжатия увеличивается до $4 \cdot 10^3$ с, т. е. на порядок. В-третьих, размер области опустошенной плазмосферы не превышает 1/3 длины силовой трубки. Ясно, что перечисленные особенности еще сильнее должны проявиться в высоких широтах.

Нерезонансный ВЧ-нагрев. При поглощении радиоволны с той же частотой ($3 \div 10$ МГц) ниже уровня ВГР эффекты качественно отличаются. В дневное время основная мощность радиоволны диссипирует в D-области ионосферы. Здесь при $PG = 0.1 \div 1$ ГВт $\theta \approx 50 \div 60$, а $N/N_0 \approx 7 \div 8$, т. е. также ожидаются гигантские возмущения, близкие к предельно возможным. В то же время в E- и F-областях эти возмущения не превышают нескольких сотен и десятков процентов соответственно. Примерно такие же возмущения должны иметь место и в ночное время, хотя величина коэффициента поглощения уменьшается почти на порядок. Как и при воздействии радиоволны на гирочастоте, процессы возмущения T_e , N и N^\pm нестационарны. Это связано с существенным различием времен становления T_e и N , а также с различной скоростью химических реакций [35, 105].

ОВЧ-, УВЧ- и СВЧ-нагрев. При увеличении частоты радиоволны ее коэффициент поглощения убывает примерно как f^{-2} . Поэтому для воздействия на ионосферу радиосистемы с $f \geq 10$ МГц практически не применяются. При этом, однако, необходимо иметь в виду, что и направленность антенны быстро растет с ростом частоты ($G \propto f^2$). Поэтому относительный энергетический потенциал, определяющий степень воздействия на околоземную плазму и равный PG/f^2 (при $f \geq 10$ МГц),

от частоты практически не зависит. Именно на это обратил внимание автор статьи в начале 70-х годов и показал, что существовавшие тогда радиосистемы метрового и дециметрового диапазонов ($f = 30 \div 3000$ МГц) способны вызывать значительные возмущения T_e .¹⁴ Так, при $P = 4 \div 6$ МВт и $G = 10^4 \div 10^5$ температура электронов T_e в нижней ионосфере должна увеличиваться в $20 \div 40$ раз, в Е- и F-областях – в $2 \div 4$ и $1.1 \div 1.5$ раза соответственно. Поскольку радиосистемы указанных диапазонов являлись радаром с длительностью импульса τ менее $2 \div 3$ мс, величина возмущения N для них не должна превышать $1 \div 10$ %.

Стохастический нагрев. Эффективность нагрева ионосферы на высотах $100 \div 300$ км невелика потому, что здесь $\tau \ll t_T$. Для ее увеличения целесообразно использовать радиоизлучение с широкополосной стохастической модуляцией [114, 115]. Можно показать, что в случае греющего поля с автокорреляционной функцией для огибающей в виде

$$R_E(t', t'') = \langle E(t')E(t'') \rangle = E_0^2 e^{-|t' - t''|/\tau_c}$$

в стационарном случае ($\tau \gg t_T$) справедливо соотношение:

$$\frac{\Delta T_{e\infty}}{T_{e0}} = \frac{\Pi_P}{\Pi_{st}} \frac{v_{ef}}{v}$$

$$\Pi_{st} = \frac{3kT_{e0}m\delta_0(\omega^2 + v_{ef}^2)}{2e^2Z_0},$$

где $v_{ef} = v + v_c$, $v_c = \tau_c^{-1}$, τ_c – интервал корреляции; $Z_0 = 120\pi$ Ом – сопротивление свободного пространства; Π_{st} – характерная плотность потока мощности, определяющая величину нагрева; Π_P – плотность потока мощности радиоизлучения; $\omega = 2\pi f$.

¹⁴См., например, работы: Л. Ф. Черногор. Геомагнетизм и аэронавигация. 1977, 17, №2, с. 213-220; В. А. Мисюра, С. И. Мартыненко, Л. Ф. Черногор. В сб.: Некогерентное рассеяние радиоволн. Апатиты. 1980, с.57-65.

Для импульсных установок с $\tau \ll t_T = (\delta_0 v)^{-1}$

$$\frac{\Delta T_e}{T_{e0}} = \frac{T_{e\infty}}{T_{e0}} \frac{\tau}{\tau_T} = \frac{\Pi_P}{\Pi_{st}} \delta_0 v_{ef} \tau.$$

В F-области ионосферы $v \ll v_c$ и $v_{ef} \approx v_c$. Для повышения эффективности нагрева радиоизлучением со стохастической модуляцией целесообразно полосу частот v_c увеличивать вплоть до $0.1f$. Тогда

$$\frac{\Delta T_e}{T_{e0}} = \frac{\Pi_P}{\Pi_{st}} \delta_0 B_s, \quad (16)$$

где $B_s = v_c \tau \approx 0.1f\tau$ – база сигнала. Из формулы (16) видно, что $\Delta T_e/T_{e0} \propto B_s, f^{-1}$. С учетом теплопроводности электронов относительная температура электронов в центре диаграммы направленности антенны $\theta_0 = \theta(0)$ дается соотношением

$$\theta_0^2(\theta_0 - 1) = I_0, \quad I_0 \approx \frac{\Pi_P}{\Pi_{st}} \delta_0 B_s \frac{L_{\perp}}{2L_{T0}}. \quad (17)$$

При $I_0 \ll 1$ имеем $\theta_0 \approx 1 + I_0$, а при $I_0 \gg 1$ величина $\theta_0 \approx I_0^{1/3} \propto (PGB_s)^{1/3}$. Выполним оценки по формуле (17) для радара в обсерватории Джикамарка (США). Его параметры: $P = 6$ МВт, $G = 3 \cdot 10^4$, $f = 50$ МГц, $\tau = 3$ мс. На высоте 300 км при $B_s = 1.5 \cdot 10^4$ имеем $\Pi_P/\Pi_{st} \approx 3.7$, $\Delta T_e/T_{e0} \approx 5.55$ (без учета теплопроводности), а с ее учетом $(\Delta T_e/T_{e0})_0 \approx 0.38$ при $L_{\perp} \approx 5$ км, $L_T = L_{T0}\theta_0^2$ и $L_{T0} \approx 20$ км.

Таким образом, используя радиосигналы со стохастической или псевдослучайной модуляцией, можно существенно увеличить T_e в F-области ионосферы, включая ее внешнюю часть. Поскольку $t_T \gg T_r \approx 10^{-2}$ с, где T_r – период повторения импульсов, возмущения T_e от отдельных импульсов (а их число $t_T/T_r \approx 1000$) будут накапливаться, величина нагрева будет расти, тепло будет распространяться вдоль магнитной силовой линии в область, где время релаксации T_e еще больше.

Так должен возникнуть поток тепла, а вместе с ним и поток вытесняемой плазмы в плазмосфере. В отличие от нагрева F-области радиоизлучением с $f \approx 3 \div 10$ МГц, при воздействии МР с $f \approx 10 \div 1000$ МГц значительное возмущение плазмосферы следует ожидать как в ночное, так и в дневное время.

Генерация искусственных геомагнитных пульсаций. Для изучения ионосферно-магнитосферных связей полезной оказывается модуляция ионосферных токов мощным радиоизлучением. Модулированная токовая струя эквивалентна антенне: она излучает сигналы на частоте модуляции МР. Так, например, можно генерировать геомагнитные пульсации в диапазоне периодов $0.1 \div 10^2$ с [104, 116-118]. Известно, что эти пульсации эффективно взаимодействуют с энергичными протонами радиационных поясов, отбирая у них энергию и вызывая их высыпание в атмосферу [16].

Для увеличения уровня геомагнитных пульсаций целесообразно использовать радиоволны, которые почти полностью поглощаются в области токовой струи (на высотах $\sim 110 \div 130$ км). Для этой же цели пригодны радиоволны с $f \approx 1 \div 2$ МГц в ночное время и $f \approx 3 \div 4$ МГц в дневное время. В работе [117] показано, что при $P_{ab} \approx 1$ МВт в области токовой струи $\theta \approx 2 \div 14$ для дня и ночи соответственно. При плотности холловского тока $j_H = 3 \cdot 10^{-8} \div 3 \cdot 10^{-6}$ А/м² ночью и днем имеем соответственно величины амплитуд среднеширотных геомагнитных пульсаций δB с периодами $T \geq 10^2$ с порядка $4 \div 40$ пТл. При этом амплитуда электрической компоненты альвеновской волны $\delta E \approx 4 \div 40$ мкВ/м. В высоких широтах амплитуда ионосферного квазистатического поля примерно в 30 раз больше и достигает величины ~ 50 мВ/м. Во столько же раз увеличиваются j_H , δB и δE . Если к тому же в высоких широтах за счет естественных возмущений на высотах $110 \div 130$ км N увеличивается до значений $\sim 10^{12}$ м⁻³, то указанные величины в итоге увеличатся примерно в 300 раз, т. е. δB и δE достигнут значений ~ 10 нТл и 10 мВ/м. Вторая причина, которая приводит к таким необычайно большим значениям δB и δE , – ионосферно-магнитосферное взаимодействие [35, 105, 120].

Именно такие значения δB при $T = 10$ мин наблюдались в высоких широтах авторами [119]. Такие амплитуды можно назвать экзотическими. Им соответствует плотность энергии $\epsilon_M = (\delta B)^2 / 2\mu_0 \approx 5 \cdot 10^{-11}$ Дж/м³ и плотность потока мощности $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ Вт/м². Этих значений достаточно для оказания значительного влияния на магнитосферные энергичные протоны и перестройки ионосферно-магнитосферного взаимодействия.

Таким образом, МР может существенно изменять параметры подсистем, нарушая установившиеся процессы взаимодействия между ними. Вместе с тем, роль МР может быть иной. Оно может приводить к распространению возмущений в горизонтальном направлении.

Крупномасштабные возмущения. Впервые возмущения подобного рода (автор настоящей работы назвал их крупномасштабными, их горизонтальный размер достигал ~ 1000 км) наблюдались нами в начале 70-х годов при воздействии на ионосферу МР, генерируемого системой НИИ Радио (г. Москва) [120-123, 35, 105]. С вводом в эксплуатацию установки “Сура” (вблизи г. Н. Новгород) воздействие на ионосферу МР стало регулярным. Это дало нам возможность систематически наблюдать крупномасштабные возмущения вблизи г. Харькова в течение почти 10 лет. Наконец, на рубеже 90-х годов выполнены немногочисленные наблюдения в период работы установки в Тромсе (Норвегия). Предпринимались также попытки сопровождать работу комплекса МР HAARP (Аляска, США). Таким образом, удаления R места излучения мощных радиоволн от пункта наблюдения составляли $\sim 100, 700, 1100, 2000$ и 10000 км. Эффективная мощность нагревных стенов изменялась от 10 до 380 МВт, частота – от 1.35 до 8 МГц. Для диагностики использовались методы частичных отражений ($z \approx 60 \div 100$ км) вертикального доплеровского зондирования ($z \approx 100 \div 300$ км), магнитометр, сеть ионосферных станций бывшего СССР, многочастотное зондирование на наклонных радиотрассах ($f = 3$ кГц \div 30 МГц) различной ориентации и протяженности (от ~ 100 до 10000 км), прием и анализ радишумов в диапазонах $1 \div 30, \sim 150 \div 160$ и $2000 \div 4000$ МГц и др. Продол-

жительность наблюдений всеми перечисленными методами составила около 10000 ч. Измерения обычно проводились в Радиофизической обсерватории (РФО) Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина [35, 105, 120-123].

В результате анализа большого объема наблюдательных данных подтверждено, что в 70-е годы нами экспериментально установлено и теоретически объяснено неизвестное ранее явление возникновения интенсивных ($\sim 100 \div 1000$ %) крупномасштабных и слабых ($\sim 1 \div 10$ %) глобальных аperiodических возмущений электронной концентрации в нижней ионосфере, а также слабых ($\sim 1 \div 5$ %) волновых возмущений в нижней и средней ионосфере, сопровождаемых вариациями геомагнитного поля, которые в первом случае стимулированы, а во втором случае вызваны воздействием мощного нестационарного радиоизлучения декаметрового и гектометрового диапазонов [35, 105].

Аperiodические процессы в нижней ионосфере (D-области) связаны с перестройкой взаимодействий в системе ТАИМ и высыпанием энергичных частиц из радиационного пояса. Время запаздывания возмущения изменялось от 5 до 15 мин, а продолжительность – от единиц до десятков минут в зависимости от режимов работы нагревного стенда и состояния радиационного пояса¹⁵.

Волновые возмущения фиксировались лишь при $R \approx 100 \div 1100$ км. Их кажущаяся скорость составляла ~ 0.3 , $0.3 \div 0.4$ и $0.5 \div 0.7$ км/с в D-, E- и F- областях ионосферы соответственно. Относительная амплитуда $\Delta N/N \approx 1 \div 5$ %, периоды $T \approx 5 \div 30$ мин, продолжительность $\sim 0.5 \div 2$ ч для нижней и средней ионосферы соответственно. Волновые возмущения заметно усиливались при периодическом нагреве ионосферы (например, при включениях установки на 5 мин с 5-минутными паузами).

¹⁵О проявлении эффекта высыпания энергичных частиц, по-видимому, наблюдавшихся также в E- и F-областях ионосферы, и роли ОНЧ- и МГД-волн см. работы [124 – 126].

Глобальные возмущения. Нами оценена также возможность глобального нагрева околоземной плазмы вещательными, связными и другого назначения радиопередающими устройствами, суммарная мощность которых в диапазонах мириаметровых, километровых, гектометровых и декаметровых радиоволн составляет несколько сотен мегаватт [35]. Поглощение этой мощности в ионосфере над экономически и технически развитыми районами (Европа, Северная Америка) должно привести к увеличению T_e и N на несколько процентов. Настолько же изменится проводимость плазмы σ_p в области ионосферной токовой струи. Это вызывает генерацию поля поляризации с напряженностью $0.1 \div 1$ мВ/м. При характерных размерах возмущенной области ~ 3000 км это должно привести к изменению “поперечной” энергии электронов в радиационном поясе на $0.3 \div 3$ кэВ. Таких изменений обычно достаточно для высыпания части электронов в атмосферу и нарушения сложившегося характера взаимодействия между ионосферой и магнитосферой.

Важно, что глобальный нагрев является нестационарным и периодическим. Дело в том, что большинство вещательных и некоторых других радиосредств включается или выключается преимущественно по окончании текущего часа, несколько реже – в 15, 30 и 45 мин каждого часа. Это приводит к генерации возмущений T_e , N и σ_p с периодом 15 мин. С тем же периодом возмущаются и магнитосферные энергичные электроны, а значит, и связанные с ними процессы. Скорее всего, эти процессы наблюдались авторами [127, 128]. Важно, что время запаздывания упомянутых процессов составляло $1 \div 3$ мин, т. е. примерно равнялось времени становления концентрации электронов в области токовой струи соответственно в дневное и ночное время.

Добавим, что подобными причинами (значительным уменьшением энергопотребления, а значит и уровня излучения линий электропередач) вызван “эффект выходных дней”, обнаруженный по вариациям геомагнитного поля [129].

Глобальные процессы, стимулированные МР, наблюдались также на искусственных спутниках Земли [130-132].

Следовательно, мощное радиоизлучение различных диапазонов является удобным и эффективным инструментом для исследования мало изученных взаимодействий между подсистемами в системе ТАИМ (в основном, между ионосферой и магнитосферой).

8.2. Старты и полеты космических аппаратов (КА)

Ракеты с включенными двигателями оказывают на околоземную среду газодинамическое, тепловое, электромагнитное и химическое воздействия [11, 12, 133-140, 148-151, 155].

Нами выполнен анализ наблюдений более чем 300 стартов КА (свыше 20 типов ракет мощностью $10^7 \div 10^{11}$ Вт) с 12 космодромов (в том числе и аварийных запусков), 55 посадок КА и 3 падений орбитальных станций. Наблюдения осуществлялись, как правило, в РФО Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина в 1975–2002 гг. с использованием перечисленных выше методов. Расстояние R от обсерватории до космодромов изменялось в пределах $750 \div 10000$ км.

Основной целью этих наблюдений было подтверждение возможности возникновения крупномасштабных и глобальных возмущений в геокосмосе, исследование механизмов их генерации и распространения, а также особенностей взаимодействия подсистем в системе ТАИМ.

Главным итогом проведенных исследований явилось установление факта возникновения крупномасштабных ($R \leq 2500$ км) и глобальных ($R \sim 10000$ км) возмущений в околоземной плазме при стартах и полетах (посадках) достаточно крупных космических аппаратов (с начальной массой не менее 100 т) [11, 12, 133]. К крупномасштабным возмущениям можем отнести и долгоживущие ионосферные “дыры” на высотах F-области ионосферы. В отличие от них, “озоновые дыры” имеют горизонтальный и вертикальный масштабы, не превышающие единиц – десятков километров. Нами идентифицированы скорости распространения возмущений. Минимальная скорость составляет порядка $0.3 \div 0.8$ км/с для нижней и средней

ионосферы соответственно. Она примерно равна скорости ударных акустических волн и АГВ с периодами $5 \div 30$ мин (для D-, E- и F- областей соответственно). Продолжительность реакции на ударную волну обычно составляла $2 \div 4$ мин и наблюдалась на расстояниях $R \leq 2500$ км. На таких же удалениях регистрировались и АГВ, их продолжительность составляла $1 \div 2$ ч.

Более быстрые возмущения переносились со скоростью $2 \div 4$ км/с. Она соответствует скорости медленных МГД-волн [78].

При стартах КА на космодромах США и Куру (Франция) иногда также регистрировались возмущения с $v \approx 10 \div 50$ км/с. Их переносчиком, возможно, являются гиротропные волны [78]¹⁶.

Особый интерес представляют возмущения, запаздывающие на несколько минут относительно стартов ракет на удалениях $R \sim 1000 \div 10000$ км. Они наблюдались в нижней ионосфере методом частичных отражений, продолжительность возмущений редко превышала $1 \div 10$ мин. Скорее всего, эти возмущения вызваны высыпанием энергичных электронов из радиационного пояса в результате нарушения сложившегося характера взаимодействия ионосферы с магнитосферой [134-140].

При посадке КА нами также наблюдались возмущения с $v \approx 2 \div 4$ и $10 \div 30$ км/с [133].

8.3. Мощные взрывы

Отдельные эффекты при воздействии мощных взрывов на околоземную среду описаны в работе [141].

Высотные ядерные взрывы оказывают на среду ионизирующее, тепловое, газодинамическое, электромагнитное, химическое и другие воздействия. В виду “комплексности” воздействия и большого энерговыделения ($\sim 10^{12} \div 10^{17}$ Дж) ядерные взрывы относятся к наиболее интересным источникам для исследования и моделирования процессов в системе ТАИМ. Конечно, их применение крайне нежелательно по экологическим соображениям.

¹⁶Нельзя исключить из рассмотрения также волны, описанные в [152 – 154], которые можно назвать магнитоградиентными волнами (волнами Хантадзе). Их скорость в течение суток изменяется от нескольких долей до нескольких десятков км/с. Подробнее об этом см. в [155].

Химические взрывы в атмосфере оказывают в основном газодинамическое воздействие на среду: генерируемая ударная волна переходит в акустическую, которая вызывает возмущения в атмосфере, ионосфере и опосредованно в магнитосфере. Химические взрывы, как ожидалось, должны быть эффективными для исследования взаимодействия между подсистемами в системе ТАИМ.

Ставший классическим проект “МАССА” был первым из проектов, направленных на комплексное экспериментальное исследование и теоретическое изучение динамических процессов в подсистемах системы ТАИМ [142]. Химический взрыв заряда массой 251 т был произведен 28.11.1981 г. в 02.31 UT в точке с координатами $43^{\circ}48'$ с. ш., $76^{\circ}51'$ в. д. В месте взрыва длительность акустического импульса τ_a была ~ 1 мс, а на расстоянии $R \sim 10$ км – уже около 1 с. В F-области ионосферы она увеличилась до 1 мин. После входа акустического импульса в ионосферу наблюдалась генерация шумовых электромагнитных сигналов с $f \sim 10$ кГц. Эти сигналы, распространяясь вдоль магнитных силовых линий, достигли магнитосферы, где возникли токовые струи и вариации геомагнитного поля с $\delta B \sim 10$ нТ.

Кроме того, возмущения от взрыва распространялись в горизонтальном направлении со скоростью $1 \div 10$ км/с (в зависимости от ориентации направления распространения по отношению к вектору \vec{B}).

К новым и неожиданным эффектам, зарегистрированным в ходе выполнения проекта “МАССА”, относятся следующие.

1) Генерация аномально сильного электромагнитного импульса с $\tau \approx 0.1$ с, $\delta B \approx 117$ нТл и $\delta E = 110$ мВ/м, обнаруженного при помощи ИСЗ “Ореол-3” (высота 800 км) на расстоянии около 700 км южнее магнитной силовой трубки взрыва. Эффект усиления магнитного сигнала авторы [143, 144] объяснили параметрическим взаимодействием с импульсом накачки, порождаемым акустическим импульсом.

2) Возмущения в плазме нижней ионосферы с периодами около 1 с [142].

3) Потоки энергичных электронов из радиационного пояса.

Последующий анализ результатов проекта “МАССА” и ряда ему подобных привел к мысли о необходимости создания нелинейных моделей связи между движениями в нейтральной атмосфере и электромагнитными возмущениями в ионосфере и магнитосфере [144].

Нами проведен анализ последствий взрывов на высотах ионосферы по результатам наблюдений, выполненных в РФО Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина в 80-е гг. Взрывы производились в СССР (полигоны Новая Земля, Семипалатинск, Капустин Яр), США (полигон Невада) и Китае. Энерговыведение при подземных ядерных взрывах (по наблюдениям 55 событий) изменялось от ~ 1 до 120 кт, при химических взрывах (11 событий) – от 1 до 10 т и подрывах ракет СС-20 (всего 24) – от $0.01 \div 0.1$ кт [79, 145].

Выполнен также анализ наблюдений последствий взрыва КА “Челленджер” 28.01.1986 г. в 08.39 UT у мыса Канаверал (США), химического взрыва (0.12 кт) в Арзамасе-16 (Россия) 4.06.1988 г. в 05.40 UT и химического взрыва (0.01 кт) в Павлограде (Украина) 12.05.1988 г. в 03.15 UT.

Удаление от места взрыва в упомянутых выше наблюдениях изменялось от 200 до 10000 км. Лучше других регистрировались возмущения, имевшие скорость $v \approx 0.3 \div 0.7$ км/с (в нижней и средней ионосфере соответственно) и только при $R \leq 1000$ км. Сравнительно редко ($\sim 30\%$) и не очень уверенно наблюдались возмущения с $v \approx 2 \div 4$ км/с при удалениях $R \sim 1000 \div 10000$ км. Еще реже ($\sim 10\%$) на тех же удалениях фиксировались процессы с $v \approx 10 \div 50$ км/с.

По-видимому, указанные возмущения переносились при помощи уже упомянутых типов волн и, кроме того, сейсмическими волнами, имеющими скорость $3 \div 4$ км/с. При мощных подземных ядерных взрывах их роль была значительной. Сейсмические волны, распространяясь в тектоносфере от источника во все стороны, на границе раздела литосфера – атмосфера передают около 1 % своей энергии акустическим волнам. Последние способны доходить до ионосферы и изменять ее параметры. Часть энергии уже в виде электромагнитных волн проникает в магнитосферу. Так осу-

ществляется взаимодействие всех подсистем в системе ТАИМ.

Для подтверждения сказанного кратко опишем результаты комплексного эксперимента с подземными ядерными взрывами.

Взрыв на полигоне Невада проведен 13.08.1987 г. в 15.00 UT, энерговыделение составило $10^{14} \div 10^{15}$ Дж [79]. Наиболее интересные эффекты зарегистрированы при помощи метода частичных отражений на высотах $57 \div 105$ км. Первое значительное увеличение (в 10 раз) средней интенсивности рассеянного сигнала на частоте 2.2 МГц имело место через $3 \div 5$ мин на высоте 105 км. Через 20 мин после этого возмущение зарегистрировано во всей D-области ионосферы. Наблюдалось 2 или 3 всплеска, длительность каждого из них $1 \div 3$ мин. На меньших высотах запаздывание на несколько минут больше. Очередная группа всплесков запаздывала на $65 \div 85$ мин. При этом имел место значительный рост (в $10 \div 20$ раз) мощности шума на частоте 2.2 МГц в полосе частот 50 кГц. Описанные эффекты, по-видимому, связаны со стимуляцией высыпаний энергичных ($20 \div 100$ кэВ) электронов из магнитосферы.

В этом же эксперименте реакция на взрыв в E- и F-областях наблюдалась на 3-ей – 5-ой минуте. Она заключалась в появлении квазипериодических вариаций в доплеровском смещении частоты (частота 3.9 МГц, трасса – вертикальная). Величина квазипериодов ~ 15 и 30 мин, продолжительность реакции не менее 80 мин, амплитуда колебаний $0.1 \div 0.2$ Гц. Спустя 38 мин после взрыва пришло второе возмущение длительностью около 20 мин.

Подземные ядерные взрывы, а также мощные химические взрывы являются источниками как акустического, так и электромагнитного излучения. Они стимулируют резкое усиление (до 100 раз) мощности ОНЧ шумового излучения, процессы в магнитосфере, и, как результат, высыпание энергичных электронов [146].

Таким образом, мощные химические и подземные ядерные взрывы оказались также удобным и эффективным инструментом для исследования процессов в системе ТАИМ. Они позволили определить типы волн, ответствен-

ных за перенос возмущений на расстояния вплоть до глобальных, а также выявить новые механизмы взаимодействия подсистем. Важно, что характер взаимодействия был нелинейным.

9. Обсуждение

Еще 10-20 лет назад процессы во всех внутренних и внешних геосферах рассматривались, как правило, изолированно друг от друга. Модели соответствующих процессов были чаще всего стационарными и линейными.

Результаты, полученные в ходе исследования естественных высокоэнергичных явлений и в процессе проведения активных экспериментов, показали, что понять все многообразие явлений невозможно без целостного восприятия объекта исследования – планеты Земля с ее внутренними и внешними оболочками. Кроме целостности объекта, важны динамика объекта и его составляющих, а также их диссипативные свойства. К тому же эволюцию составляющих невозможно описать без учета прямых и обратных связей. Более того, характер взаимодействия между подсистемами часто был нелинейным. Все это позволило сформулировать основные положения системной парадигмы. Приведенные в работе примеры подтверждают представление о том, что система ТАИМ – открытая диссипативная динамическая нелинейная система. Это означает, что дальнейшее и более глубокое понимание процессов, протекающих в системе, должно базироваться на системном подходе.

Система ТАИМ в целом является самоорганизующимся объектом, в котором есть своеобразный “синхронизатор”, упорядочивающий процессы. Вместе с тем, на вполне регулярные процессы накладываются стохастические процессы, наблюдается их чередование.

В системе ТАИМ можно ожидать возникновения детерминированного хаоса при отсутствии стохастических вынуждающих сил.

Особое место в свойствах системы ТАИМ занимает свойство эмергентности, появление триггерных механизмов высвобождения запасенной энергии. Такие механизмы найде-

ны во всех подсистемах. Важно, что коэффициент триггерности может быть не просто большим, а очень большим (например, 10^9).

При проведении активных экспериментов энерговыделение стало сравнимым с энерговыделением, имеющим место при протекании многих естественных процессов. Это позволило смоделировать целый ряд природных явлений, оценить “порог уязвимости” подсистем, выявить новые взаимосвязи между подсистемами, определить механизмы переноса возмущений, идентифицировать скорости их распространения. Оказалось (см. табл. 10), что возмущения, вызванные источниками энерговыделения различной физической природы, переносятся при помощи одних и тех же волн [147, 148].

Важными и часто неожиданными следствиями наблюдений за высокоэнергичными явлениями как естественного, так и ис-

кусственного происхождения стали следующие.

1) Воздействие на одну из подсистем приводит к активной перестройке сложившегося характера взаимодействия между подсистемами, к проявлению ряда нелинейных свойств системы и ее подсистем.

2) Локальные (такие как взрывы, старты ракет) и локализованные (такие как грозы, землетрясения) источники способны вызывать крупномасштабные и даже глобальные возмущения в системе ТАИМ.

3) Среднеширотное высыпание энергичных частиц из радиационного пояса сопровождается большинством воздействий на одну из подсистем в системе ТАИМ (табл. 11)¹⁷.

¹⁷Параметры потоков частиц оценены по увеличению N в D-области ионосферы, полученном при помощи радара частичных отражений Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина. Радар описан в [11-12].

Таблица 10. Типы волн, переносящих возмущения на глобальные расстояния

Тип волны	Фазовая скорость, км/с	Период, с	Декремент затухания, км ⁻¹	Среда распространения
Акустическая	0.3 ÷ 0.7	10 ⁻² ÷ 300	10 ² ÷ 10 ⁻⁵	Атмосфера (z ≤ 400 км)
Внутренняя гравитационная	0.3 ÷ 0.7	>300	10 ⁻⁴ ÷ 10 ⁻³	Атмосфера (z ≤ 400 км)
Медленная МГД	10 ÷ 1	10 ² ÷ 10 ⁴	2·10 ⁻³ ÷ 2·10 ⁻⁴	Е-область ионосферы F-область ионосферы
	50 ÷ 5	10 ² ÷ 10 ⁴	10 ⁻³ ÷ 10 ⁻⁴	
Сейсмическая: продольная поперечная	6.5 ÷ 7.5	0.1 ÷ 30	10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻³	Литосфера То же
	4 ÷ 5			
Хантадзе [152 – 154]: день ночь	~0.3 ÷ 1	3·10 ⁴ ÷ 2·10 ⁵	Не оценивался	Е-область ионосферы То же
	~1 ÷ 5	5·10 ² ÷ 2.4·10 ³	Не оценивался	
Гиротропная: день ночь	10 ÷ 100	10 ÷ 10 ⁴	Не оценивался	Е-область ионосферы То же
	100 ÷ 1000		Не оценивался	
МГД	~1000	>10 ⁻²	<10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻⁴	Ионосфера, магнитосфера

Таблица 11. Параметры потоков высыпавшихся энергичных частиц и производимая ими ионизация, полученные по измерениям электронной концентрации на радаре частичных отражений

Событие	Дата	Вид частиц	Высота, км	N , м ⁻³	ΔN , м ⁻³	q , м ⁻³ ·с ⁻¹	Δq , м ⁻³ ·с ⁻¹	Π_p , Вт/м ²	Π , м ⁻² ·с ⁻¹	ϵ , кэВ
Магнитная буря	15.06.83	Электроны (протоны)	55 ÷ 60	10 ⁸	3·10 ⁸	10 ⁵	15·10 ⁵	1.8·10 ⁻⁶	2.3·10 ⁷ (7.8·10 ⁵)	500 (15000)
Магнитная буря	15.05.97	Электроны	84	1,2·10 ⁹	0,5·10 ⁹	1,4·10 ⁷	1,5·10 ⁷	1,5·10 ⁻⁶	3,8·10 ⁸	60
Протонная вспышка	25.02.91	Электроны (протоны)	72.5	10 ⁹	5·10 ⁹	10 ⁷	35·10 ⁷	3.5·10 ⁻⁵	1.6·10 ⁹ (1.2·10 ⁷)	150 (20000)
Вечерний терминатор	24.05.97	Электроны	80	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁷	3·10 ⁷	3.4·10 ⁻⁶	2.7·10 ⁸	80
Утренний терминатор	25.05.97	Электроны	80	8·10 ⁸	6·10 ⁸	6.4·10 ⁶	1.3·10 ⁷	2.2·10 ⁻⁶	1.7·10 ⁸	80
Середина ночи	25.05.97	Электроны	90	—	3·10 ⁸	—	3·10 ⁵	3·10 ⁻⁸	5·10 ⁶	40
Затмение Солнца	11.08.99	Электроны	84	3·10 ⁸	5·10 ⁸	9·10 ⁵	55·10 ⁵	3.1·10 ⁻⁷	3.2·10 ⁷	60
Землетрясение	24.08.99	Электроны	84	5·10 ⁸	4·10 ⁸	2.5·10 ⁶	5.6·10 ⁶	6.3·10 ⁻⁷	6.6·10 ⁷	60
Старт КА	15.05.87	Электроны	80	10 ⁹	10 ⁹	3·10 ⁶	9·10 ⁶	10 ⁻⁶	2·10 ⁸	80
Мощное ВЧ радиоизлучение	01.03.91	Электроны	88	4·10 ⁹	3·10 ⁹	1.3·10 ⁷	2.7·10 ⁷	2.7·10 ⁻⁶	4.5·10 ⁸	40

Источники энергоснабжения различной физической природы способны вызвать в средних широтах потоки энергичных электронов с плотностью $10^7 \div 10^9 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

4) В системе возможны триггерные механизмы высвобождения энергии.

В настоящей работе затронуты вопросы антропогенного воздействия на систему ТАИМ. Изучение влияния процессов в этой системе на человека и биосферу в целом представляет самостоятельный интерес (см., например, [156, 157]).

Хотя системная парадигма сформулирована автором более 10 лет назад¹⁸, она еще не стала основой синтетической теории, методом и методологией изучения системы ТАИМ как сложного открытого диссипативного динамического нелинейного объекта. Еще не сформулирована замкнутая совокупность уравнений для небольшого числа функций и их аргументов, которая бы достаточно полно описывала взаимодействие между подсистемами. Мало изучены нелинейные механизмы взаимодействия подсистем, пороги их устойчивости и проявления свойства эмерджентности.

Исходя из новой парадигмы и получив замкнутую совокупность уравнений, описывающих систему ТАИМ в целом, можно не только интерпретировать труднообъяснимые (или необъясненные ранее) явления в системе, но и определить пороги устойчивости подсистем, границы детерминированных и хаотических режимов и т. д. Это позволит, в частности, обосновать саму целесообразность и указать допустимые пределы точности моделирования и прогнозирования погоды, климата, космической погоды и т. п. на заданном интервале времени.

10. Выводы

1. Обосновано, представление о том, что образование ТАИМ является сложной открытой динамической нелинейной системой. Сформулированы основные положения сис-

темной парадигмы. Системная парадигма должна стать основой теории, методом и методологией изучения системы ТАИМ как сложного открытого диссипативного динамического нелинейного объекта. Разумеется, обсуждаемая парадигма не исключает детального исследования каждой из подсистем традиционными методами.

2. Показано, что к важнейшим свойствам системы ТАИМ относится возможность появления триггерных механизмов высвобождения энергии. В ряде случаев коэффициент триггерности может достигать значений $10^5 \div 10^{10}$.

3. Продемонстрировано, что высокоэнергичные явления (землетрясения, вулканизм, грозы, мощные атмосферные вихри, терминатор, затмения Солнца, вспышки на Солнце, геокосмические бури и т. п.) вызывают сложный комплекс процессов в системе ТАИМ, приводят к перестройке характера взаимодействий подсистем, к накоплению и высвобождению энергии.

4. Активные эксперименты оказались удобными и эффективными средствами для моделирования процессов в подсистемах и их взаимодействия. Они показали ограниченность линейного описания реакции подсистем на мощное энергоснабжение, позволили установить возможность возникновения крупномасштабных и глобальных возмущений при локальном и локализованном энергоснабжении, а также выявить и идентифицировать типы волн, переносящих указанные возмущения.

5. Показано, что высыпание энергичных электронов в средних широтах сопровождается большинством нестационарных процессов в системе ТАИМ. Их потоки составляют величину порядка $10^7 \div 10^9 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Обоснованы механизмы, приводящие к высыпанию частиц. К ним относятся замедление энергичных электронов в ионосферно-магнитосферном квазистатическом электрическом поле и передача их энергии шумовому ОНЧ-излучению.

Работа выполнена при поддержке Научно-технологического центра Украины, проектное соглашение № 1772.

¹⁸Как уже отмечалось выше, в малодоступном издании [5], и поэтому работа осталась не замеченной специалистами.

Автор благодарен соавторам научных публикаций, коллегам и ученикам, в процессе общения с которыми сформировались основные воззрения на системную парадигму. Автор признателен также К. П. Гармашу за помощь в выполнении отдельных численных расчетов, направленных на изучение взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой.

Литература

1. А. Д. Данилов, Э. С. Казимировский, Г. В. Вергасова, Г. Я. Хачикян. Метеорологические эффекты в ионосфере. Ленинград, Гидрометеиздат, 1986, 272 с.
2. Э. С. Казимировский, В. Д. Кокоуров. Геомагнетизм и аэрономия. 1995, **35**, №3, с. 1-23.
3. М. Б. Гохберг, В. А. Моргунов, О. А. Похотелов. Сейсмо-электромагнитные явления. Москва, Наука, 1988. 174 с.
4. В. А. Липеровский, О. А. Похотелов, С. Л. Шалимов. Ионосферные предвестники землетрясений. Москва, Наука, 1992, 304 с.
5. Л. Ф. Черногор. В книге: Нетрадиционные научные идеи о природе и ее явлениях. (Сборник докладов всесоюзной конференции). Т. 2. Гомель, 1990, с. 221-229.
6. Физика космоса. Маленькая энциклопедия. Москва, Советская энциклопедия, 1986, 783 с.
7. T. J. Fuller-Rowell, M. V. Codrescu, R. G. Roble, A. D. Richmond. In: Bruce T. Tsurutani, Walter D. Gonzalez, Yohsuke Kamide, John K. Arballo (eds.). How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm? Magnetic Storm. Geophysical Monograph 98, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1997.
8. G. W. Prölss. In: Bruce T. Tsurutani, Walter D. Gonzalez, Yohsuke Kamide, John K. Arballo (eds.). Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere. Magnetic Storm. Geophysical Monograph 98, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1997.
9. А. С. Монин, Ю. А. Шишков. УФН. 2000, **170**, №4, с. 419-444.
10. С. И. Авдюшин, А. Д. Данилов. Геомагнетизм и аэрономия. 2000, **40**, №5, с.3-14.
11. К. П. Гармаш, А. М. Гоков, Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов, Ю. П. Федоренко, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор. Вестник Харьковского университета. Радиофизика и электроника. 1998, №405, с. 157-177; 1999, №427, с. 3-22.
12. К. П. Гармаш, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор. ЗР. Успехи современной радиоэлектроники. 1999, №7, с. 3-15; №8, с. 3-19.
13. Л. Ф. Черногор. Космічна наука і технологія. 1999, **5**, №1, с. 38-47.
14. Г. Хакен. Синергетика. Москва, Мир, 1980, 404 с.
15. Синергетика. Москва, Мир, 1984, 312 с.
16. П. А. Беспалов, В. Ю. Трахтенгерц. Альвеновские мазеры. Горький, ИПФ АН СССР, 1986, 190 с.
17. М. Н. Изаков. УФН. 1997, **167**, №20, с. 1087-1094.
18. Г. М. Заславский, Р. З. Сагдеев. Введение в нелинейную физику. От маятника до турбулентности и хаоса. Москва, Наука, 1988, 368 с.
19. Т. Постон, И. Стюарт. Теория катастроф и ее приложения. Москва, Мир, 1980, 362 с.
20. Р. Гилмор. Прикладная теория катастроф. Москва, Мир, 1984, 350 с. (кн. 1), 285 с. (кн. 2).
21. Г. Г. Шустер. Детерминированный хаос: Введение. Москва, Мир, 1988, 240 с.
22. П. Гленсдорф, И. Пригожин. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. Москва, Мир, 1973, 280 с.
23. Г. Николис, И. Пригожин. Самоорганизация в неравновесных системах. Москва, Мир, 1979, 512 с.
24. В. Эбелинг. Образование структур при необратимых процессах. Москва, Мир, 1979, 262 с.
25. Г. Хакен. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. Москва, Мир, 1985, 419 с.
26. В. А. Васильев, Ю. М. Романовский, В. Г. Юхно. Автоволновые процессы. Москва, Наука, 1987, 240 с.
27. А. Ю. Лоскутов, А. С. Михайлов. Введение в синергетику. Москва, Наука, 1990, 272 с.
28. А. В. Гульельми. МГД-волны в околоземной плазме. Москва, Мир, 1979, 140 с.
29. V. I. Petviashvili, O. A. Pokhotelov. Solitary waves in Plasmas and in the Atmosphere. Gordon and Breach Science Publishers Reading, 1992, 280 pp.
30. О. А. Похотелов, Л. Стенфло, П. К. Шукла. Физика плазмы. 1996, **22**, №10, с. 941-953.
31. Г. Д. Абурджания. Физика плазмы. 1996, **22**, №10, с. 954-959.
32. Б. С. Кернер, В. В. Осипов. Автосолитоны. Москва, Наука, 1991, 200 с.
33. М. И. Рабинович, Д. И. Трубецков. Введение в теорию колебаний и волн. Москва, Наука, 1984, 432 с.
34. А. С. Бакай, Г. К. Солодовников. Изв. вузов. Радиофизика. 1986, **29**, №6, с. 645-653.
35. К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор. ЗР. Успехи современной радиоэлектроники. 1998, №6, с. 17-40.

36. В. И. Карпман. Нелинейные волны в диспергирующих средах. Москва, Наука, 1973, 176 с.
37. Дж. Уизем. Линейные и нелинейные волны. Москва, Мир, 1977, 622 с.
38. Ю. П. Мальцев. Геомагнетизм и аэрономия. 1992, **32**, №3, с. 109-112.
39. А. А. Арыков, Ю. П. Мальцев. Геомагнетизм и аэрономия. 1995, **35**, №6, с. 161-163.
40. E. Nielsen, K. Schlegel. *J. Geophys. Res.* 1983, **88**, pp. 5745-5754.
41. Ю. М. Свирижев. Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. Москва, Наука, 1987, 368 с.
42. Г. Ф. Деминова, М. Г. Деминов, Л. М. Ерухимов, О. Н. Савина, Л. А. Юдович. Геомагнетизм и аэрономия. 1982, **22**, №2, с. 211-215.
43. Е. А. Мареев, О. В. Мареева. Геомагнетизм и аэрономия. 1999, **39**, №6, с. 74-79.
44. В. И. Петвиашвили, О. А. Похотелов. Уединенные волны в плазме и магнитосфере. Москва, Энергоиздат, 1988, 199 с.
45. Ф. Ф. Каменец, И. И. Коробов, М. Ф. Иванов, В. Е. Фортов, В. А. Гальбурт, С. С. Моисеев, О. Г. Онищенко. Электромагнитные волны и электронные системы. 1998, **3**, №2, с. 35-45.
46. Е. А. Мареев, А. Е. Сорокин. Изв. вузов. Радиофизика. 2001, **44**, №1-2, с. 148-162.
47. Б. И. Козелов, Т. В. Козелова. Геомагнетизм и аэрономия. 2002, **42**, №1, с. 59-66.
48. П. В. Блюх, А. П. Николаенко, Ю. Ф. Филиппов. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля-ионосфера. Киев, Наукова думка, 1977, 200 с.
49. В. А. Tinsley. *J. Geomagn. Geoelectr.* 1996, **48**, pp. 165-172.
50. М. И. Пудовкин, О. М. Распопов. Геомагнетизм и аэрономия. 1992, **32**, №5, с. 1-22.
51. В. К. Ролдугин, Э. В. Вашенюк. Геомагнетизм и аэрономия. 1994, **34**, №2, с. 155-158.
52. Г. В. Старков, В. К. Ролдугин. Геомагнетизм и аэрономия. 1994, **34**, №2, с. 156-159.
53. В. И. Ермаков. Геомагнетизм и аэрономия. 2000, **40**, №1, с. 129-132.
54. Дж. Р. Герман, Р. А. Голдберг. Солнце, погода и климат. Ленинград, Гидрометеиздат, 1981, 320 с.
55. М. Г. Гельберг. Геомагнетизм и аэрономия. 1994, **34**, №1, с. 48-53.
56. А. Д. Сытинский. Связь сейсмичности Земли с состоянием межпланетной среды и атмосферными процессами. Ленинград, Гидрометеиздат, 1987, 99 с.
57. В. М. Сомников. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата, Наука, 1983, 192 с.
58. Ю. Е. Тарашук, П. М. Нагорский, Б. Б. Борисов, Н. Е. Егоров, В. В. Жебсаин, В. Ф. Киселев, Е. И. Петрушин, Н. И. Тимченко, Б. Б. Цыбиков. Нестационарные процессы в ионосфере Земли и их влияние на распространение радиоволн. Томск, изд-во Томского университета, 1986, 164 с.
59. K. Davies. *Ionospheric Radio*. London, Peter Peregrinus Ltd, 1990, XX, 580 pp.
60. С. А. Намазов, В. Д. Новиков, И. А. Хмельницкий. Изв. вузов. Радиофизика. 1975, **18**, №4, с. 473-500.
61. В. А. Bolt. *Nature*. 1964, **202**, No. 4937, pp. 1095-1096.
62. W. L. Donn, E. S. Posmentier. *J. Geophys. Res.* 1964, **69**, No. 24, pp. 5327-5361.
63. K. Davies, D. M. Baker. *J. Geophys. Res.* 1965, **70**, No. 9, pp. 2251-2253.
64. R. V. Row. *J. Geophys. Res.* 1966, **71**, No. 1, pp. 343-345.
65. В. П. Пустоветов, Е. В. Гинзбург, А. Б. Малышев, И. П. Прошкина. Космические исследования. 1993, **31**, вып. 3, с. 123-128.
66. В. П. Пустоветов, А. Б. Малышев. Космические исследования. 1993, **31**, вып. 5, с. 84-89.
67. Е. В. Гинзбург, А. Б. Малышев, И. П. Прошкина, В. П. Пустоветов. Геомагнетизм и аэрономия. 1994, **34**, №3, с. 60-66.
68. Электромагнитные предвестники землетрясений. Москва, Наука, 1982, 88 с.
69. М. Б. Гохберг, В. А. Моргунов, Е. А. Герасимович, И. В. Матвеев. Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений. Москва, Наука, 1985, 116 с.
70. А. Л. Бучаченко, В. Н. Ораевский, О. А. Похотелов, В. Н. Сорокин, В. Н. Страхов, В. М. Чмырев. УФН. 1997, **166**, №9, с. 1023-1029.
71. *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*. Edited by M. Hayakawa and Y. Fujinawa. Tokyo, TERRAPUB, 1994, 868 pp.
72. С. И. Мартыненко, И. М. Фукс, Р. С. Шубова. Геомагнетизм и аэрономия. 1994, **34**, №2, с. 121-129.
73. И. М. Фукс, Р. С. Шубова. Геомагнетизм и аэрономия. 1994, **34**, №2, с. 130-136.
74. Э. М. Дмитриев, С. В. Анисимов. Геомагнетизм и аэрономия. 1994, **34**, №3, с. 97-103.
75. П. В. Блюх. Радиофизика и радиоастрономия. 1997, **2**, №2, с. 146-151.
76. В. М. Сорокин, Я. К. Ященко. Геомагнетизм и аэрономия. 1999, **39**, №2, с. 100-106.
77. И. П. Пасечник. Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях. Москва, Наука, 1979, 192 с.
78. В. М. Сорокин, Г. В. Федорович. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. Москва, Энергоиздат, 1982, 136 с.

79. К. П. Гармаш, А. И. Гритчин, С. Г. Леус, О. В. Пахомова, С. Н. Похилько, Л. Ф. Черногор. Физика космической плазмы. Сборник трудов Международного семинара, 6-10 июня 1993, Киев, Украина, с. 151-160.
80. U. S. Inan, T. F. Bell, J. V. Rodriguez. *Geophys. Res. Lett.* 1991, **18**, pp. 705-708.
81. Y. N. Taranenko, U. S. Inan, T. F. Bell, J. V. Rodriguez. *Geophys. Res. Lett.* 1993, **20**, pp. 1539-1542.
82. V. P. Pasko, U. S. Inan, Y. N. Taranenko, T. F. Bell. *Geophys. Res. Lett.* 1995, **22**, pp. 365-368.
83. Ю. М. Ямпольский, В. С. Белей, С. Б. Кашеев, В. Е. Пазнухов, А. Г. Рохман. *Радиофизика и радиоастрономия.* 1997, **2**, №3, с. 267-273.
84. Y. Yampolski, P. Bliokh, V. Beley, V. Galushko, S. Kascheev. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997, **59**, №3, p. 335-342.
85. Э. Э. Госсард, У. Х. Хук. *Волны в атмосфере.* Москва, Мир, 1978, 532 с.
86. Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор. *Радиофизика и радиоастрономия.* 1999, **4**, №3, с. 209-226.
87. А. М. Гоков, Л. Ф. Черногор. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2000, **5**, №4, с. 348-360.
88. Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2000, **5**, №4, с. 361-370.
89. Л. Ф. Черногор. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2000, **5**, №4, с. 371-375.
90. Л. А. Акимов, Е. И. Григоренко, В. И. Таран, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор. *ЗР. Успехи современной радиоэлектроники.* 2002, №2, с. 25-63. См. также работы: Е. И. Григоренко, В. И. Таран, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор. *Труды XX Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн, 2-4 июля 2002 года, Нижний Новгород, 2002.* с. 54-55; L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, V. I. Taran, O. F. Tyrnov. XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, Programme, poster presentations Maastricht Exhibition and Congress Center (MECC), Maastricht the Netherlands. 17-24 August 2002, P. 2278.
91. К. Г. Иванов. *Геомагнетизм и аэрономия.* 1976, **16**, №5, с. 771-779.
92. L. M. Klein, L. F. Burlaga. *J. Geophys. Res.* 1982, **87**, No. A2, pp. 613-619.
93. R. W. Wilson. *Space Sci.* 1987, **35**, No. 3, pp. 329-336.
94. А. Д. Данилов. *Популярная аэрономия.* Ленинград, Гидрометеиздат, 1989, 230 с.
95. Е. И. Григоренко, Л. Я. Емельянов, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор. *Труды XX Всероссийской конференции по распространению радиоволн. Нижний Новгород, 2-4 июля 2002 г., с. 56-57.* См. также работы: Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор. *Труды XX Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн, 2-4 июля 2002 года, Нижний Новгород, 2002,* с. 42-43; L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, V. I. Taran, O. F. Tyrnov. XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, Programme, poster presentations Maastricht Exhibition and Congress Center (MECC), Maastricht the Netherlands. 17-24 August 2002, P. 2279; L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, V. I. Taran, O. F. Tyrnov. XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, Programme, poster presentations Maastricht Exhibition and Congress Center (MECC), Maastricht the Netherlands. 17-24 August 2002, P. 2280; L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, V. T. Rozumenko, O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal. XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, Programme, poster presentations Maastricht Exhibition and Congress Center (MECC), Maastricht the Netherlands. 17-24 August 2002. P. 0143; Л. С. Костров, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор, А. М. Цымбал. *Вторая Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям. Кацивели, Крым, 2002,* с. 46.
96. В. А. Бронштэн. *Физика метеорных явлений.* Москва, Наука, 1981, 416 с.
97. В. Н. Лебединец. *Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве. Метеоры.* Ленинград, Гидрометеиздат, 1980, 247 с.
98. C. R. Chapman, D. Morrison. *Nature.* 1994, No. 367, pp. 33-40.
99. В. Г. Кручиненко, Ю. И. Волошук, Б. Л. Кашеев, А. М. Казанцев, Д. Ф. Лупішко, Я. С. Яцків. *Космічна наука і технологія.* 1999, **5**, №1, с. 3-17.
100. Л. Ф. Черногор. *Естествознание. Интегрирующий курс.* Харьков, ХНУ, 2000, 415 с.
101. А. В. Гуревич, А. Б. Шварцбург. *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере.* Москва, Наука, 1973, 272 с.
102. A. V. Gurevich. *Nonlinear Phenomena in the Ionosphere.* Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin, 1978, 372 pp.
103. О. А. Молчанов. *Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме.* Москва, Наука, 1985, 224 с.
104. Н. А. Митяков, С. М. Грач, С. Н. Митяков. *Возмущение ионосферы мощными радиоволнами.* В кн.: *Итоги науки и техники. ВИНТИ. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы.* **9**, Москва, 1989, 140 с.
105. К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор. *Электромагнитные явления.* 1998, **1**, №1, с. 90-110.

106. А. М. Гоков, С. И. Мартыненко, В. А. Мисюра, Л. А. Пивень, В. Г. Сомов, Ю. П. Федоренко, Л. Ф. Черногор, А. С. Шемет. Геомагнетизм и аэрономия. 1982, **22**, №5, с. 748-752.
107. Л. Ф. Черногор. В кн.: XIV Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. Тезисы докладов. Часть 1, Москва, Наука, 1984, с. 117-120.
108. Л. Ф. Черногор. Изв. вузов. Радиофизика. 1985, **28**, №1, с. 17-26.
109. Л. Ф. Черногор. В кн.: XIX Всероссийская научная конференция по распространению радиоволн. Тезисы докладов. Казань, 22-25 июня 1999, с. 355-356.
110. L. F. Chernogor. 8th Scientific Assembly of IAGA with ICMA and STP Symposia, IAGA 1997, Abstract Book, p. 346.
111. В. В. Васьков, Я. С. Димант, Н. А. Рябова, В. В. Клименко, Л. М. Дункан. Геомагнетизм и аэрономия. 1992, **32**, №5, с. 140-152.
112. L. M. Duncan, J. P. Sheerin, R. A. Benhke. Phys. Rev. Lett. 1988, **61**, No. 2, с. 239-242.
113. В. В. Васьков, Г. П. Комраков, Н. А. Рябова. Геомагнетизм и аэрономия. 1995, **35**, №5, с. 75-82.
114. Ю. П. Блюх, М. Г. Любарский, В. О. Подобинский, Я. Б. Файнберг. Физика плазмы. 1993, **19**, №3, с. 442-444.
115. Ю. П. Блюх. Физика плазмы. 1995, **21**, №8, с. 702-707.
116. Л. Ф. Черногор. Космические исследования на Украине. 1981, вып. 15, с. 67-72.
117. Л. Ф. Черногор. Геофизический журнал. 1982, **4**, №2, с. 86-91.
118. Л. Ф. Черногор. Геофизический журнал. 1983, **5**, №5, с. 45-50.
119. P. Stubbe, H. Kopka. J. Geophys. Res. 1981, **A86**, No. 3, pp.1606-1608.
120. К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор, А. Б. Шварцбург. Компьютерная оптика. 1989, вып. 6, с. 62-71.
121. Л. Ф. Черногор. Геомагнетизм и аэрономия. 1989, **29**, №3, с. 513-515.
122. Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор. Геомагнетизм и аэрономия. 1990, **30**, №1, с. 159-161.
123. L. F. Chernogor. In: Vth International Suzdal URSI Symposium on the Modification of Ionosphere. ISSMI'98. Book of Abstracts. Suzdal, August 26-29, 1998, p. 77.
124. J. W. Wright. J. Geophys. Res. 1975, **80**, No. 31, pp. 4338-4386.
125. Ю. М. Ямпольский. Изв. вузов. Радиофизика. 1989, **32**, № 6, с. 457-461.
126. P. V. Ponomarenko, Yu. M. Yampolski, A. V. Zalizovski, D. L. Hysell. J. Geophys. Res. 2000, **105**, A1, pp. 171-181.
127. А. В. Гульельми, Б. В. Довбня, Б. И. Клайн, В. А. Пархомов. Геомагнетизм и аэрономия. 1978, **18**, №1, с. 179-181.
128. А. В. Гульельми, О. Д. Зотов, Б. И. Клайн, Н. Н. Русаков, П. П. Беляев, Д. С. Котик, С. В. Поляков, В. О. Рапопорт. Геомагнетизм и аэрономия. 1985, **25**, №1, с. 102-106.
129. A. C. Fraser-Smith, Chung-Chung-Pak. Science News. 1977, **111**, No. 24, pp. 379-381.
130. В. М. Костин, Ю. А. Романовский, В. М. Чмырев, В. М. Синельников, В. В. Афонин, Н. Д. Борисов, В. А. Зюзин, Н. В. Исаев, Г. П. Комраков, Ю. М. Михайлов, О. Е. Овчаренко, М. С. Петров, С. А. Намазов, В. В. Селегей, Я. П. Соболев, Е. П. Трушкина. Космические исследования. 1993, **31**, вып.1, с. 84-92.
131. В. В. Васьков, Н. И. Будько, Г. Л. Гдалевич, О. В. Капустина, Г. П. Комраков, А. Н. Маресов, Ю. М. Михайлов, И. С. Прутенский, Н. А. Рябова. Геомагнетизм и аэрономия. 1995, **35**, №1, с. 98-106.
132. В. В. Васьков, Г. П. Комраков, В. Н. Ораевский, И. С. Прутенский, С. А. Пулинец, А. Кирага, З. Клос. Геомагнетизм и аэрономия. 1995, **35**, №1, с. 154-158.
133. Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор. Радиофизика и радиоастрономия. 1999, **4**, №3, с. 227-246.
134. L. F. Chernogor, K. P. Garmash, V. T. Rozumenko. Radio Physics and Radio Astronomy. 1998, **3**, No. 2, pp. 191-197.
135. L. F. Chernogor, K. P. Garmash, V. T. Rozumenko, O. F. Tyrnov. In: Vth International Suzdal URSI Symposium on the Modification of Ionosphere. ISSMI'98. Book of Abstracts. Suzdal, August 26-29, 1998, p. 84.
136. L. F. Chernogor, K. P. Garmash, V. T. Rozumenko. In: Vth International Suzdal URSI Symposium on the Modification of Ionosphere. ISSMI'98. Book of Abstracts. Suzdal, August 26-29, 1998, p. 35.
137. L. F. Chernogor, K. P. Garmash, V. T. Rozumenko. XXVIth General Assembly URSI. Abstracts. Toronto, 13-21 August, 1999, p. 749.
138. К. П. Гармаш, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор. XIX Всероссийская научная конференция по распространению радиоволн. Тезисы докладов, Казань, 22-25 июня 1999, с. 357.
139. К. П. Гармаш, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор. XIX Всероссийская научная конференция по распространению радиоволн. Тезисы докладов, Казань, 22-25 июня 1999, с. 141.
140. L. F. Chernogor, K. P. Garmash, V. T. Rozumenko, O. F. Tyrnov. XXVIth General Assembly URSI. Abstracts. Toronto, 13-21 August, 1999, pp. 751.

141. Л. С. Альперович, М. Б. Гохберг, В. И. Дроб-
жев, В. А. Троицкая, Г. В. Федорович. Физика Зем-
ли. 1985, №11, с. 5-8.
142. Л. С. Альперович, Е. А. Пономарев, Г. В. Фе-
дорович. Физика Земли. 1985, №11, с. 6-20.
143. С. Л. Шалимов. Физика плазмы. 1997, **23**, №7,
с. 670-671.
144. С. Л. Шалимов, М. Б. Гохберг. ДАН. 1999, **368**,
№2, с. 250-253.
145. L. F. Chernogor, K. P. Garmash, S. G. Leus,
O. V. Pakhomova, S. N. Pokhil'ko, Yu. Ye. Sorokolet.
Physics in Ukraine. International Conference. Kiev,
22-27 June, 1993. Proceedings Contributed Papers.
Plasma Physics, pp. 58-61.
146. Ю. М. Михайлов, Г. А. Михайлова, О. В. Капу-
стина. Геомагнетизм и аэрономия. 1998, **38**, №6,
с. 66-72.
147. L. F. Chernogor, V. T. Rozumenko. Кинематика и
физика небесных тел. Приложение. 2000, №3,
с. 514-516.
148. L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, V. T. Rozumenko.
Кинематика и физика небесных тел. Приложение.
2000, №3, с. 497-499.
149. Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов,
Л. Ф. Черногор. Труды XX Всероссийской науч-
ной конференции по распространению радиоволн,
2-4 июля 2002 года, Нижний Новгород, 2002.
с. 44-45.
150. L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, V. T. Rozumenko,
O. F. Tyrnov. XXVII General Assembly of the
International Union of Radio Science, Programme,
poster presentations Maastricht Exhibition and
Congress Centre (MECC), Maastricht the
Netherlands. 17-24 august 2002. P. 0142.
151. Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов,
Л. Ф. Черногор. Сборник тезисов. Вторая Украин-
ская конференция по перспективным космическим
исследованиям. Кацивели, Крым, 2002, с. 45.
152. А. Г. Хантадзе. ДАН. 2001, **376**, №2, с. 250-252.
153. Г. Д. Абурджания, А. Г. Хантадзе. Геомагнетизм
и аэрономия. 2002, **42**, №2, с. 245-251.
154. А. Г. Хантадзе. Геомагнетизм и аэрономия.
2002, **42**, №3, с. 333-335.
155. В. П. Бурмака, Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор.
Радиофизика и радиоастрономия. 2003, **8**, №2
(в печати).
156. Б. М. Владимирский, К. Н. Сидякин, Н. А. Те-
мурьянц. Космос и биологические ритмы. Симфе-
рополь, 1995. 156 с.
157. Л. Н. Литвиненко, Ю. В. Аристов, П. В. Блюх,
О. В. Буданов, Б. В. Лазебный, В. Е. Пазнухов,
А. Г. Рохман, В. И. Сухоруков, И. А. Сербиненко,
Л. П. Забродина. Радиофизика и радиоастрономия.
1998, **3**, №3, с. 312-319.

Physics of Earth, Atmosphere, and Geospace from the Standpoint of System Paradigm

L. F. Chernogor

The validation has been provided that the tec-
tonosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere
system (TAIMS) is a complex open dynamic non-
linear system. The basic aspects of the system par-
adigm 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 phe-
nomena in the system give rise to a complex clus-
ter of processes and to the reconstruction in the
subsystem coupling.

The active experiments in the TAIMS have
established the limitation of the linear description
of the subsystem response to powerful energy re-
leases, determined the possibility of large-scale and
global-scale perturbation onset from local and lo-
calized energy releases, as well as revealed and
identified the types of waves transferring these
disturbances.

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