

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 550.388.2

Едемский Илья Константинович

**ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДНЕМАШТАБНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ
ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ СОЛНЕЧНЫМ
ТЕРМИНАТОРОМ, ПО ДАННЫМ GPS**

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск–2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
профессор Афраймович Эдуард Леонтьевич

Научный консультант:

доктор физико-математических наук
Леонович Анатолий Сергеевич

Официальные оппоненты:

Сажин Виктор Иванович
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиофизики ИГУ

Шагимуратов Ирк Ибрагимович
кандидат физико-математических наук,
директор ЗО ИЗМИРАН

Ведущая организация:

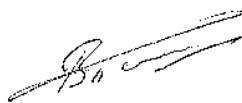
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова.

Защита состоится «27» марта 2012 г. в «14:00» часов на заседании диссертационного совета Д.003.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЗФ СО РАН

Автореферат разослан «__» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Поляков В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Исследование влияния солнечного терминатора (СТ) на ионосферу Земли является важной задачей физики ионосферы. СТ представляет собой стабильное повторяющееся природное явление, характеристики которого изучены достаточно хорошо. Таким образом, учитывая воздействие СТ на ионосферу, параметры которой постоянно изменяются, мы получаем уникальное по масштабам геофизическое исследование, условия проведения которого можно сравнивать с лабораторными. Исследование эффектов СТ обусловлено не только чисто научным интересом к проблеме изучения атмосферы Земли как единой динамической системы, но и необходимостью решения ряда прикладных задач радиосвязи, радиолокации, навигации и т. п., поскольку эффекты СТ оказывают влияние на характеристики распространяющихся радиосигналов.

Ранние исследования показали (например, [1–3]), что движение СТ вызывает генерацию акустико-гравитационных волн (АГВ), неустойчивости и флуктуации в ионосферной плазме. Большое разнообразие атмосферных эффектов, связанных с СТ, послужило поводом для целого ряда исследований [4–7] вариаций ионосферных параметров во время прохождения СТ с помощью различных методов зондирования ионосферы. Однако в основном все экспериментальные данные были получены на одиночных станциях и только для временных вариаций ионосферных параметров, влияние на которые могут оказывать самые различные факторы. Это затрудняет достоверную идентификацию возмущений в атмосфере, связанных с СТ, так как в общем случае они могут генерироваться разнообразными источниками как естественного, так и техногенного происхождения [8, 9]

Среди публикаций по данной теме следует выделить работу [7], в которой пространственно-временные характеристики (скорость и направление распространения) крупномасштабного (КМ) волнового возмущения были сопоставлены с аналогичными параметрами СТ и показано, что эти возмущения вызваны движущимся терминатором. Тем не менее, в этой работе измерения также проводились только на одной станции (радар некогерентного рассеяния в Millstone Hill, США) и лишь для нескольких дней. Основываясь на этих данных, нельзя восстановить пространственный образ «терминаторного» возмущения.

Впервые анализ пространственной структуры КМ атмосферного возмущения, связанного с СТ, за период с 2001 по 2007 г. выполнен в работе [10]. Авторы обнаружили «терминаторную» волну в нейтральной составляющей термосферы на высоте ~400 км по данным акселерометра, установленного на борту спутника CHAMP. Было показано, что при низкой солнечной активности и в течение лета в Северном полушарии фазовый фронт волнового возмущения на утреннем терминаторе простирался от 60° S до почти 30° N с углом наклона по отношению к терминатору порядка 30°. Амплитуда вариаций плотности нейтральных частиц составила около 3–5 % по отношению к фону, а горизонтальная длина волны ~3000 км. Однако предложенный в работе [10] метод предполагает накопление данных

за очень длительные интервалы времени – не менее 130 дней. Полученная усредненная картина, без сомнения, может нести информацию об общих чертах КМ-составляющей «терминаторной» волны и при этом достаточно сильно отличаться от реального явления, включающего в себя возмущения различных масштабов, изменяющегося в зависимости от сезона, геомагнитной обстановки т. д.

В теоретических работах, посвященных ионосферным эффектам СТ [3], указывалось на возможность генерации волновых возмущений среднего масштаба. Так, в работе [11] авторы приводят распределения количества волновых возмущений в ионосфере за сутки для четырех сезонов, демонстрирующие два пика, положение которых на шкале времени меняется с сезоном. Из данного наблюдения авторы [11] делают вывод о связи этих возмущений с прохождением СТ. Следует сказать, что представленные измерения проведены в небольшом регионе на четырех антеннах, разнесенных на 40 км, а следовательно, нельзя исключать наличия региональных особенностей образования волновых возмущений в течение суток. Кроме того, такие отдельные наблюдения не позволяют восстановить пространственную структуру возмущения и соотнести ее с пространственными параметрами линии СТ.

В последнее десятилетие в изучении неоднородностей ионосферы был достигнут определенный прогресс благодаря новой технологии GPS-радиозондирования. Данная технология позволяет получать данные о состоянии ионосферы, а именно о вариациях полного электронного содержания (ПЭС). В ИСЗФ СО РАН разработаны методы и технология GLOBDET глобального GPS-детектирования ионосферных возмущений, позволяющие исследовать ионосферные возмущения с амплитудой до 10^{-3} от фонового значения ПЭС [9]. В сравнении с классическими методами радиозондирования ионосферы, технология GLOBDET впервые обеспечила возможность мониторинга ионосферных возмущений практически в реальном времени и по всему земному шару. При проведении исследований на плотных сетях станций GPS, таких, например, как в Калифорнии и Японии, технология GPS-радиозондирования позволяет наблюдать пространственно-временную структуру ионосферных возмущений с хорошим разрешением.

Используя технологию исследования ионосферных неоднородностей по данным измерений ПЭС на сети приемников GPS, авторы работы [12] обнаружили новый класс среднемасштабных ионосферных возмущений (СМ ПИВ) – волновые пакеты (ВП), проявляющиеся в форме узкополосных колебаний ПЭС, однако механизм генерации ВП не был идентифицирован. Учитывая установленное в работе [12] отсутствие корреляции наблюдений ВП с какими-либо более-менее значимыми воздействиями антропогенного характера, можно предполагать, что источник данных волновых возмущений имеет естественную природу, в том числе таким источником может выступать и солнечный терминатор.

Учитывая более высокую, в сравнении с классическими методами исследования ионосферы, разрешающую способность GPS-детектора, можно ожидать, что его использование позволит обнаружить не наблюдавшиеся ранее эффекты СТ в ионосфере, подкрепить теоретические представления о них и уточнить данные, полученные в предыдущих экспериментах.

Предметом исследования в настоящей диссертации являются особенности ионосферных возмущений среднего масштаба, которые проявляются в форме волновых пакетов и регистрируются в переходной области ионосферы по данным вариаций ПЭС, измеряемых с помощью приемников GPS.

Целью работы является определение пространственно-временных характеристик среднемасштабных ионосферных возмущений типа волновых пакетов в переходной области СТ, а также их динамических и спектральных параметров по данным сетей приемников GPS.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Накопление статистики наблюдений волновых пакетов для различных регионов земного шара и различных геофизических условий.
2. Разработка методов, алгоритмов и программ для исследования спектральных характеристик СТ-возмущений. Детальный анализ спектральной картины вариаций ПЭС в различные сезоны.
3. Проверка гипотезы о связи волновых пакетов с прохождением солнечного терминатора.
4. Определение пространственной структуры перемещающихся волновых пакетов и их параметров, таких как длина волны, протяженность и наклон фронта, направление распространения и т. п.

Методы исследования

В диссертации для определения величины вариаций ПЭС использовались данные двухчастотных фазовых измерений системы GPS, входящих в плотные сети приемников: глобальную международную сеть IGS и японскую региональную сеть GSI (GEONET). Для вычисления скорректированных геомагнитных координат использовались международная модель магнитного поля IGRF-10 и модель Н.А. Цыганенко [13].

Научная новизна исследования

1. Впервые представлено экспериментальное свидетельство существования волновых пакетов магнитогидродинамической природы, связанных с прохождением по ионосфере Земли солнечного терминатора.
2. Впервые для обоих полушарий Земли получена картина сезонных вариаций динамического спектра среднемасштабных волновых пакетов, генерируемых солнечным терминатором.
3. С применением новой методики, использующей систему отсчета, связанную с локальным временем терминатора, на основе наблюдений на плотных сетях GPS-станций получено прямое экспериментальное доказательство генерации солнечным терминатором волновых пакетов. В предшествующих работах их существование доказывалось только статистически на основании обработки массивов данных измерений в отдельных точках.

4. С использованием новой методики обработки первичных данных GPS на обширном статистическом материале получена морфология среднемасштабных волновых пакетов для различных регионов Земли.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обусловлена использованием физически обоснованных методов и представительной статистикой наблюдений. Полученные физические характеристики находятся в качественном и количественном согласии с результатами исследований, опубликованными ранее другими авторами.

Практическая ценность работы состоит в том, что полученные результаты и разработанные методы могут быть использованы для улучшения существующих и разработки новых моделей магнитосферно-ионосферных взаимодействия и моделей ионосферных неоднородностей, развития методов прогнозирования ошибок позиционирования в спутниковых радионавигационных системах, а также при уточнении деталей механизма генерации волновых возмущений в ионосфере.

Внедрение результатов

Результаты, полученные в диссертации, используются при выполнении следующих проектов:

1. Федеральная целевая научно-техническая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы».

2. ОКР «Разработка технических предложений на создание аппаратно-программного комплекса и технологии для идентификации ионосферных возмущений с использованием сигналов GPS и ГЛОНАСС». Федеральная целевая программа «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации на 2008–2015 годы».

3. Программа СО РАН 2.9.1. «Физика Солнца и околоземного космического пространства». Проект 2.9.1.4 «Экспериментальные исследования верхней атмосферы и ионосферное распространение радиоволн».

4. Программа фундаментальных исследований ОФН РАН № 12 «Современные проблемы радиофизики». Проект 12.4 «Разработка комплексных методов диагностики ионосферных возмущений различного происхождения в верхней атмосфере Земли».

5. Программа фундаментальных исследований ОФН РАН № IV.13. Проект 2.13.1. «Радиофизические методы исследования динамических процессов в верхней атмосфере Земли».

6. Инициативный проект РФФИ № 07-05-00127 «Глобальное электронное содержание и солнечная активность» (научный руководитель – Афраймович Э.Л.).

7. Инициативный проект РФФИ № 09-05-00760 «Исследование тропосферно-ионосферных связей по радиофизическим, оптическим и спутниковым данным» (научный руководитель – Черниговская М.А.).

8. Инициативный проект РФФИ № 10-05-00113 «Исследование терминаторных волн ионосферно-магнитосферной природы на средних широтах» (научный руководитель – Воейков С.В.).

9. Грант президента РФ МК-3094.2010.5 «Исследование среднеширотных ионосферно-магнитосферных возмущений, влияющих на функционирование спутниковых радионавигационных систем» (научный руководитель – Воейков С.В.).

Личный вклад автора

Основные результаты диссертации, опубликованные в шестнадцати работах, являются оригинальными и получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. В том числе восемь работ опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов: *Geophysical Research Letters*, *Advances in Space Research*, *Annales Geophysicae*, *Planetary and Space Science*, Доклады академии наук, Оптика атмосферы и океана, Геомагнетизм и аэрономия, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.

Автору принадлежит:

1. Проверка гипотезы о связи генерации среднемасштабных волновых пакетов с прохождением СТ.

2. Детальное исследование морфологии среднемасштабных волновых пакетов на значительном статистическом материале по данным плотных сетей GPS за период 1998–2010 гг.

3. Разработка методики и программного обеспечения для расчета динамических спектров вариаций полного электронного содержания по данным GPS.

4. Исследования динамических спектров волн, генерируемых солнечным терминатором, для различных сезонов и различных геофизических условий.

5. Исследование связи генерации среднемасштабных волновых пакетов с прохождением СТ в магнитосопряженной области.

Автор принимал непосредственное участие в разработке программ и проведении исследований по регистрации волновых пакетов, определению их структуры и связи с солнечным терминатором, а также определению механизмов генерации волновых пакетов. Кроме того, автор участвовал в постановке задачи, анализе и обсуждении полученных результатов, подготовке статей для публикации.

При проведении исследований, представленных в настоящей диссертации, автором были частично использованы программы И.В. Живетьева, Е.А. Косогорова и С.В. Воейкова.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на следующих семинарах, научных и научно-технических конференциях: XXII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», Ростов-на-Дону, 2008; Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Красноярск, 2008; VII Международная конференция «Проблемы геокосмоса», С.-Петербург, 2008;

37th COSPAR Scientific Assembly, Montreal, 2008; EGU General Assembly, Vienna, 2009, 2010; IAGA 11th Scientific Assembly Sopron, Hungary, 2009; 9-я Российско-Китайская конференция по космической погоде, п. Листвянка, 2009; БШФФ-2009, Иркутск; Progress In Electromagnetics Research Symposium, Moscow, 2009; Научные чтения памяти В.М. Полякова, Иркутск, 2009; Конференция «Солнечно-земная физика», Иркутск, 2010; 38th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, 2010; V Международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», с. Паратунка, 2010; Российская научная конференция «Зондирование земных покровов радаром с синтезированной апертурой», Улан-Удэ, 2010; Научные чтения памяти Э.Л.Афраймовича, Иркутск, 2010; Восьмая Всероссийская конференция «Современные проблемы зондирования Земли из космоса», Москва, 2010; Всероссийская конференция с международным участием «Физика окружающей среды», Томск, 2011; БШФФ-2011, Иркутск; XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium of International Union of Radio Science, Istanbul, 2011.

Основные положения, выносимые на защиту

1. На основе обработки обширного массива статистических данных, полученных на плотных сетях GPS-приемников в различных регионах Земли, показано, что движение солнечного терминатора вызывает генерацию в ионосфере среднемасштабных волновых возмущений, проявляющихся в форме волновых пакетов с характерными пространственными масштабами в несколько сотен километров.

2. Доказана связь колебаний ПЭС, наблюдаемых в форме волновых пакетов над территориями Японии и США на плотных сетях GPS-приемников, с прохождением солнечного терминатора над магнитосопреженными областями ионосферы Южного полушария.

3. Определены морфология и спектр волновых пакетов, генерируемых солнечным терминатором, которые в наблюдениях по данным GPS имеют вид цепочек узкополосных колебаний полного электронного содержания со средним периодом около 20 мин, пространственными масштабами 100–300 км и длительностью 1–2 ч.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав основного материала, заключения, списка цитируемой литературы, содержащего 124 ссылки. Общий объем диссертации – 182 страницы, включая 1 таблицу, 40 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы, отражена актуальность ее темы, сформулированы цели диссертации и решаемые задачи, приведено краткое содержание диссертации.

В **первой главе** дается обзор работ в области исследования эффектов солнечного терминатора в ионосфере. Анализируются экспериментальные исследования эффектов СТ в ионосфере. Представлены теоретические выкладки по вопросу влияния СТ на параметры ионосферы.

Во **второй главе** приведены общие сведения о системе GPS и существующих сегодня сетях двухчастотных приемников GPS. Изложен метод определения ПЭС по данным двухчастотных фазовых измерений в системе GPS. Описаны современные методы исследования ионосферных неоднородностей с помощью системы GPS, изложен метод измерения скорости и направления перемещения ионосферных неоднородностей с использованием решетки приемников GPS. Дано описание используемых в работе методов картирования пространственной структуры вариаций ПЭС и расчета их динамического спектра. Приведено описание используемого в работе разработанного в ИСЗФ СО РАН комплекса программ GLOBDET, предназначенного для детектирования возмущений в ионосфере.

В системе GPS производятся непрерывные и высокоточные измерения группового и фазового запаздывания на двух когерентно-связанных частотах $f_1=1575.42$ МГц и $f_2=1227.60$ МГц, что позволяет определить приращение ПЭС:

$$I = \int_D N(s) ds = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2 + const + \sigma\phi], \quad (1)$$

где $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ – приращения фазового пути радиосигнала (м) для частот f_1 и f_2 (Гц); $const$ – некоторый неизвестный начальный фазовый путь (м); $\sigma\phi$ – ошибка в определении фазового пути (м).

Ошибка определения ПЭС стандартным методом по разности фазового пути $L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2$ на двух частотах для одного 30-секундного интервала усреднения не превышает 10^{14} м⁻², хотя начальное значение ПЭС и остается неизвестным. Это позволяет детектировать неоднородности ионизации и волновые процессы в ионосфере в широком диапазоне значений амплитуд (до 10^{-3} от суточного изменения ПЭС).

Программный комплекс GLOBDET позволяет регистрировать по данным системы GPS вариации полного электронного содержания в широком диапазоне амплитуд и периодов. Согласно исследованиям соответствия характеристик ионосферных возмущений пространственно-временным характеристикам вариаций ПЭС [9], детектируемые возмущения ПЭС dI хорошо согласуются с горизонтальной частью соответствующих локальных возмущений электронной концентрации dN , повторяя ее поведение, и нахождение параметров возмущений ПЭС позволяет, таким образом, определять горизонтальную проекцию пространственно-временных параметров локальных возмущений электронной концентрации. Полученные в работе результаты относятся к ПЭС, однако дают хорошее представление о поведении электронной концентрации в рассматриваемых регионах.

В **третьей главе** представлены результаты статистических исследований характеристик волновых возмущений, генерируемых солнечным терминатором.

Приведена детальная морфология, полученная на большом статистическом материале, при различных геофизических условиях.

Среднемасштабные ионосферные возмущения терминаторного происхождения регистрируются как узкополосные колебания ПЭС, имеющие форму волнового пакета. На рис. 1 представлены волновые возмущения ПЭС, зарегистрированные 18 октября 2001 г. над территорией США. Геомагнитная обстановка в рассматриваемый день была спокойной ($K_p < 1.7$). Черная линия на рис. 1, *a* отмечает движение проекции ионосферной точки на высоте 300 км луча между станцией MONB и спутником PRN 14. Штриховая линия отмечает положение СТ на высоте 100 км в 13:00 UT (08:00 LT по локальному времени), стрелкой показано направление его движения. Треугольники отмечают положение станций, данные которых представлены на остальных панелях: исходные ряды данных, сглаженные с окном 2 мин (*в*), и ряды, отфильтрованные в диапазоне 2–90 мин (*з*).

Для более детального исследования вида среднемасштабной составляющей «терминаторного» возмущения мы провели фильтрацию рядов данных в диапазоне 5–20 мин с использованием полосового фильтра Баттерворта 8-го порядка. На рис. 2 представлены данные вариаций ПЭС в западной и восточной областях США (1-й и 2-й столбцы), а также над Европой (3-й столбец). Каждый регион представлен пятью станциями, разнесенными по широтам. Координаты и названия станций приведены на панелях. На панели *a* отражено изменение абсолютного ПЭС 18.10.2001 г., полученное по данным лаборатории CODG, серой линией на оси абсцисс отмечен диапазон, рассматриваемый на панелях *б–е*. Черные ромбы отмечают появление СТ на высоте 100 км над станцией.

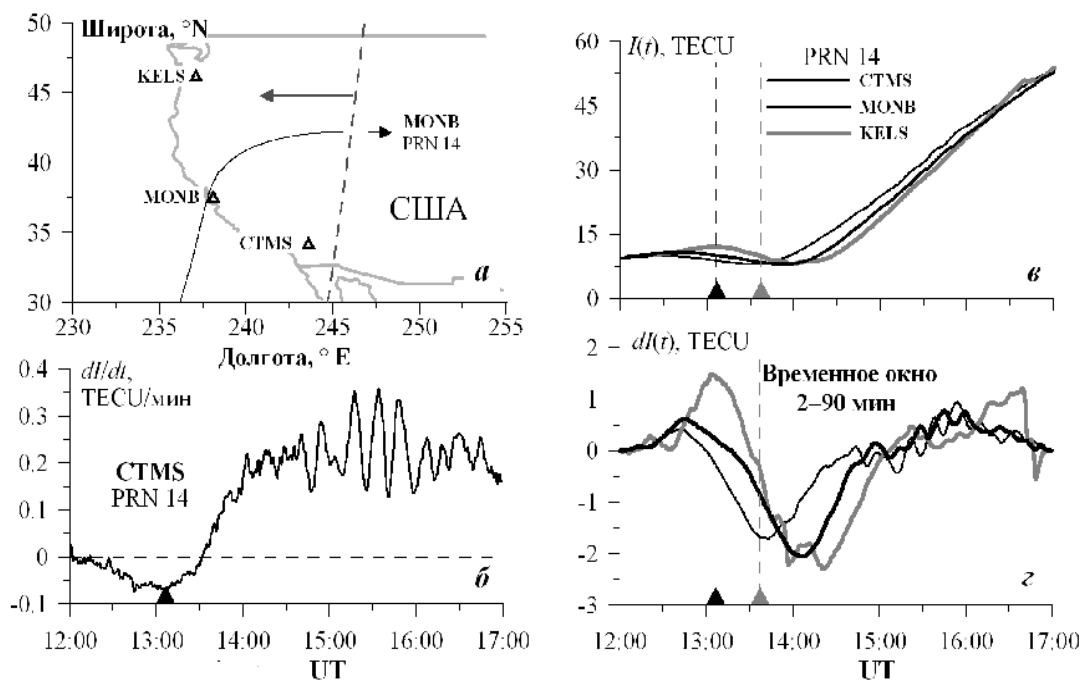


Рис. 1. Геометрия GPS-измерений во время движения терминатора над территорией Запада США 18 октября 2001 г. (*a*). Исходные (*в*) и отфильтрованные (*з*) вариации ПЭС на лучах трех станций и НИСЗ PRN14. Производная вариаций ПЭС, полученная по данным станции CTMS (*б*).

18 октября 2001 г. ($K_p < 1.7$)

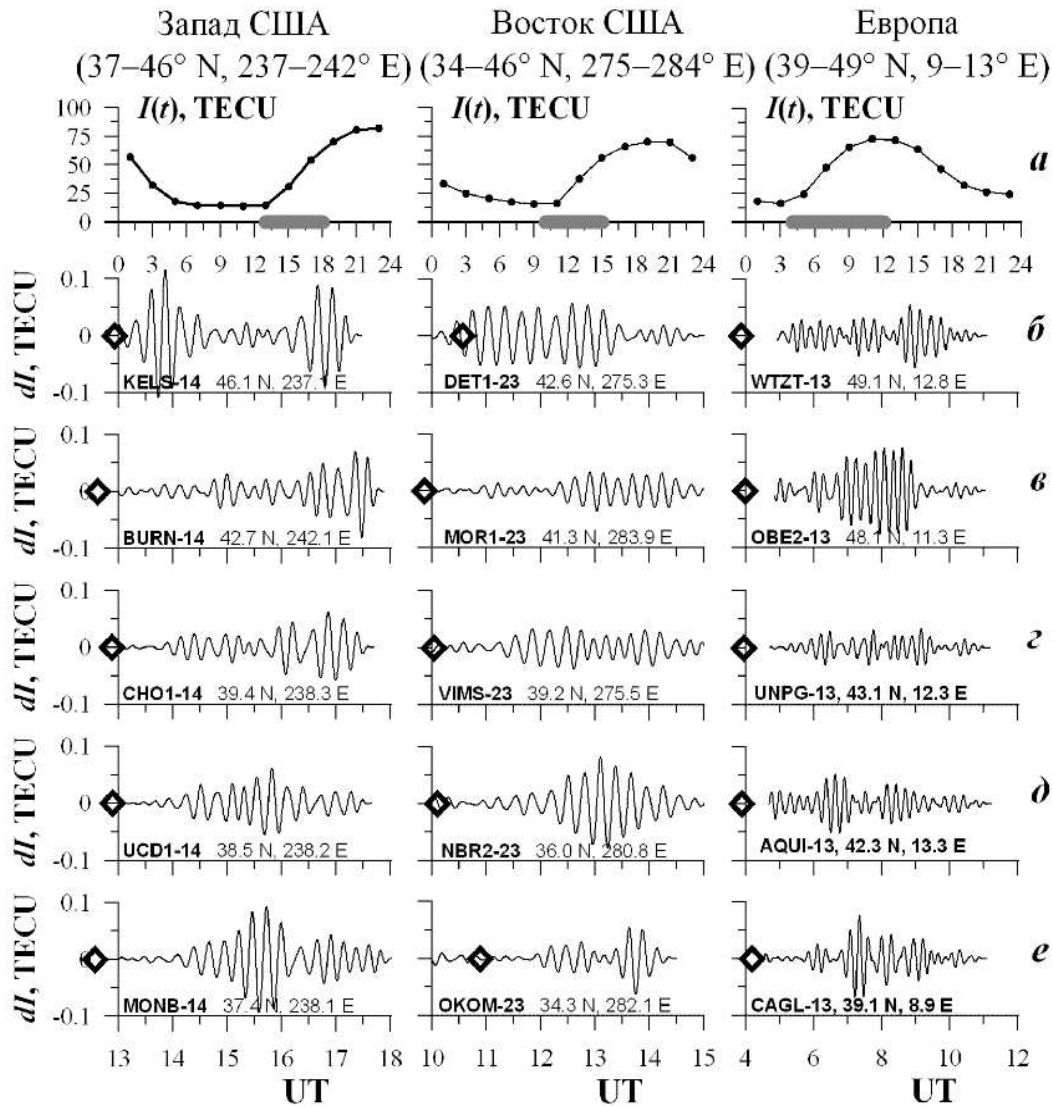


Рис. 2. Волновые вариации ПЭС, зарегистрированные над США (1-й и 2-й столбцы) и Европой (3-й столбец) 18 октября 2001 г.

Рисунок 2 дает представление о виде регистрируемых волновых пакетов и позволяет заключить, что данное явление наблюдается в различных точках земного шара, разнесенных на значительные расстояния, и во всех случаях появление волновых пакетов привязано к прохождению солнечного терминатора над областью наблюдения.

Для проверки гипотезы о связи генерации ВП с появлением СТ мы ввели систему локального времени терминатора (система ЛВТ): $dT = t_{\text{obs}} - t_{\text{st}}$, где t_{obs} – момент времени в точке, данные которой мы рассматриваем, а t_{st} – время прихода терминатора на высоту h над данной точкой. Преимущество данного подхода заключается в переходе от использования конкретных координат точек измерения к рассмотрению временного интервала между моментом получения данных в точке и моментом появления СТ в ней. Это позволяет исследовать данные измерений только в контексте взаимосвязи с терминатором.

На рис. 3 представлены распределения количества волновых пакетов, зарегистрированных при различных условиях, в системе ЛВТ для высоты СТ $h=200$ км, полученные в результате обработки данных мировой сети станций за период 1998–2007 гг. С использованием метода выделения ВП в вариациях ПЭС, описанного в [12], было зарегистрировано 275 426 волновых пакетов по данным за 277 полных суток.

На рис. 3, *а* представлено распределение в системе ЛВТ ($h=200$ км) волновых возмущений, зарегистрированных в западной части США 18 октября 2001 г. на лучах спутника PRN 14. Рисунок 3, *б* демонстрирует распределение возмущений, зарегистрированных в этот день по миру для всех спутников. Максимум обоих распределений приходится на 3 часа после прохождения утреннего терминатора на высоте 200 км.

Состояние геомагнитной обстановки оказывает влияние на форму распределения. На рис. 3, *з–е* представлены распределения числа зарегистрированных возмущений в системе ЛВТ ($h=200$ км). При низком уровне геомагнитной активности ($K_p < 3$) наибольшее число возмущений регистрируется после прохождения утреннего терминатора (рис. 3, *з*). В момент прохождения СТ на высоте $h=200$ км волновые возмущения практически не регистрируются. Затем число зарегистрированных возмущений резко увеличивается, достигая максимума через три часа, после чего плавно спадает. Кроме того, наблюдается увеличение, связанное с прохождением вечернего СТ.

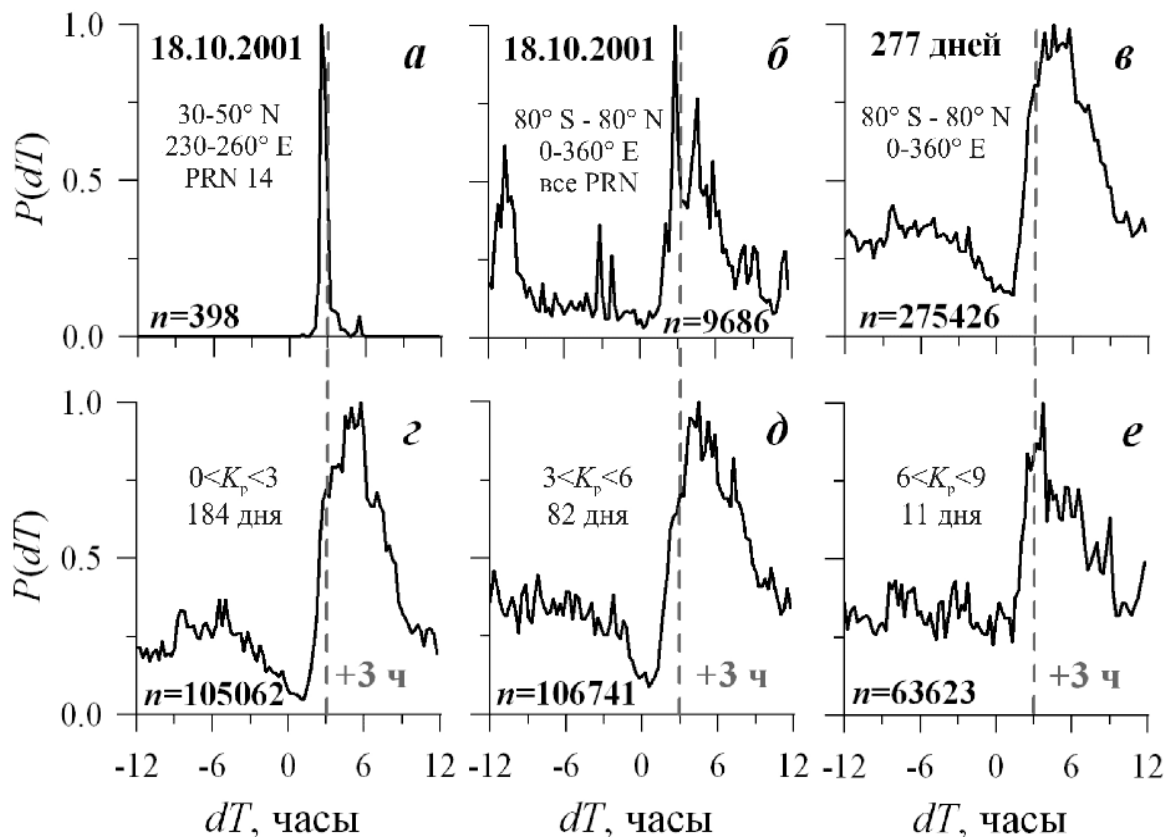


Рис. 3. Распределения волновых возмущений в системе ЛВТ для различных геофизических условий. Общее число возмущений n в каждом случае приведено панелях.

С повышением уровня геомагнитной возмущенности ($3 < K_p < 6$) возрастает число волновых возмущений (рис. 3, д). Так за 82 дня средней возмущенности ($3 < K_p < 6$) было зарегистрировано количество пакетов большее, чем за 182 слабозвозмущенных дня ($K_p < 3$). На участке 0–3 ч нарастание распределения происходит так же резко, тогда как последующий спад происходит более медленно, увеличивая ширину распределения. Уровень фоновых возмущений на рис. 3, д выше, чем на рис. 3, г, однако на время появления СТ приходится по-прежнему малое число возмущений.

Дальнейшее увеличение возмущенности обеспечивает регистрацию возмущений в течение всего дня, создавая этим фон в распределении (рис. 3, е). Однако и в таких условиях максимальное число возмущений регистрируется спустя 3 ч после прохождения СТ.

Четвертая глава посвящена исследованиям пространственно-временной структуры волновых возмущений, генерируемых солнечным терминатором, и ее изменений в зависимости от смены геофизических условий и времен года. В данной главе также представлены результаты спектрального анализа вариаций ПЭС, проведенного для различных сезонов по данным плотных сетей GPS.

Исследования пространственно-временной структуры волновых возмущений ПЭС проводились на основе картирования распределения амплитуды вариаций ПЭС в заданном регионе. С этой целью для каждой станции и выбранного спутника выполнялся расчет вариаций ПЭС вдоль луча «спутник–приемник» на основе формулы (1). Для исключения вариаций регулярной ионосферы, а также трендов, внесенных движением спутника, временные ряды сглаживались методом скользящего среднего, затем из них удалялся линейный тренд. Параметры временного окна для сглаживания и удаления тренда подбираются в зависимости от решаемой задачи. Так образуется набор рядов вариаций ПЭС $dI(t)$ в некотором диапазоне периодов.

Нормировка амплитуды вариаций производится посредством преобразования наклонного ПЭС в «вертикальное» в предположении, что ионосфера представляет собой тонкий слой на высоте 300 км.

В результате мы получаем набор временных рядов нормированных вариаций ПЭС, привязанных к подыоносферной точке (в случае если перемещением подыоносферной точки можно пренебречь, в качестве координат подыоносферной точки выбираются координаты станции GPS). Таким образом, каждой подыоносферной точке пары «спутник–приемник» каждого 30-секундного отсчета соответствует определенное значение амплитуды вариаций.

Применение этой технологии к данным плотных сетей GPS, таких как калифорнийская сеть станций и японская сеть GEONET, позволяет получить карту распределения амплитуды вариаций ПЭС и наблюдать пространственную структуру ионосферных неоднородностей среднего масштаба и изменение ее со временем.

Разрешение получаемой карты вариаций ПЭС, очевидно, находится в прямой зависимости от расстояния между приемными пунктами сети. Наилучшее на сегодняшний день разрешение предоставляет сеть GEONET со средним расстоянием между приемниками ~ 18 км, позволяя, таким образом, наблюдать пространственную структуру возмущений с характерной длиной волны ~ 40 км.

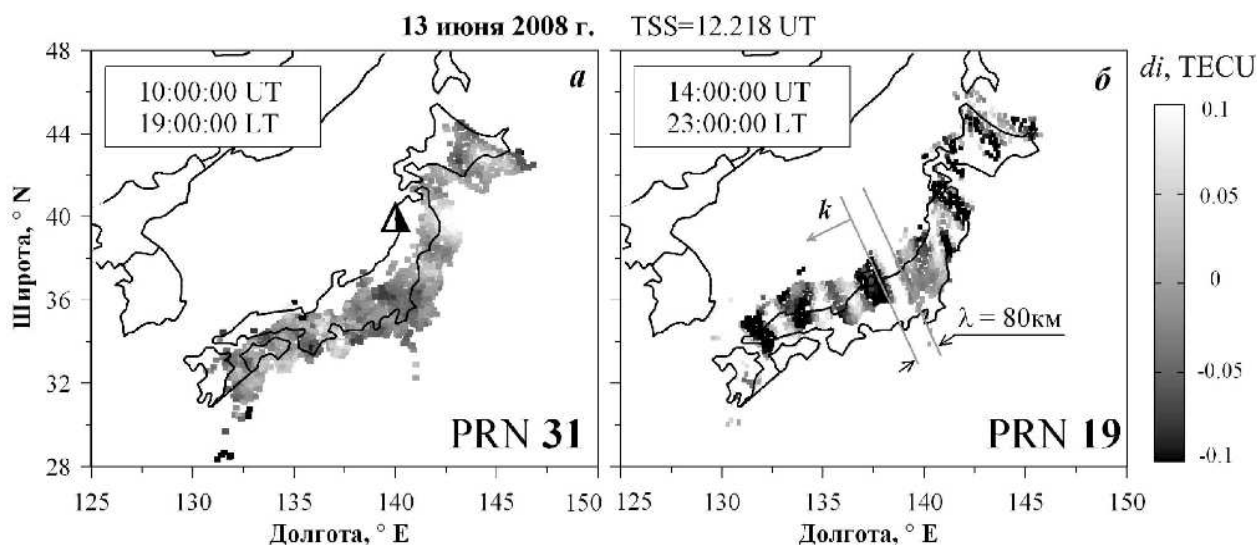


Рис. 4. Структура вариаций ПЭС до (а) и после (б) прохождения СТ.

На рис. 4 представлена пространственная структура вариаций ПЭС над Японией, полученная по данным сети GEONET за 13 июня 2008 г., наблюдаемая до (а) и после (б) прохождения терминатора, на лучах до спутников PNR 31 и PNR 19 соответственно. Амплитуда вариаций ПЭС $dI(t)$ в первом случае составляет порядка 0.1 TECU, во втором – около 0.3 TECU. Треугольник (рис. 4, а) отмечает точку, над которой на высоте 300 км вечерний СТ проходит в $T_{ss}=12.2$ ч по Гринвичу.

Структура, наблюдаемая за два с лишним часа до прохождения вечернего СТ, представляет собой интерференционное поле возмущений от различных источников, не имеющее какого-либо выраженного направления и четкой формы. После прохождения терминатора (рис. 4, б) ситуация в значительной степени меняется: наблюдается четкая периодическая структура с выраженной анизотропией и сохраняющимся фазовым фронтом. Линиями на рис. 4, б отмечено положение максимумов волн пакета. Вдоль Японии укладывается не менее 10 волн с $\lambda \sim 80$ км.

Для оценки частотного состава наблюдаемых волновых возмущений ПЭС удобно применить методику расчета динамического спектра в системе ЛВТ. Расчет каждого единичного спектра производится по данным непрерывного ряда в 256 отсчетов. Более длинные непрерывные ряды входных данных разбивались на отдельные ряды по 256 отсчетов с шагом 10 мин для более продуктивного использования. Далее определялась разность между моментом времени, соответствующим середине используемого ряда данных, и временем прохождения СТ над точкой наблюдения. Этому значению на оси ЛВТ ставился в соответствие вычисленный спектр.

На рис. 5 представлены динамические спектры вариаций ПЭС над Японией в системе ЛВТ, полученные усреднением 14 988 794 одиночных спектров для летнего периода (а), 13 693 040 – для периода равноденствия (б) и 14 148 600 – для зимнего периода (в) по данным за 21 день 2008–2009 гг. Градациями серого дана амплитуда, шкала которой приведена на рисунке справа. Серая линия отмечает время прохождения вечернего СТ на высоте 300 км (SS), штриховая – в магнито-сопряженной области (МССТ).

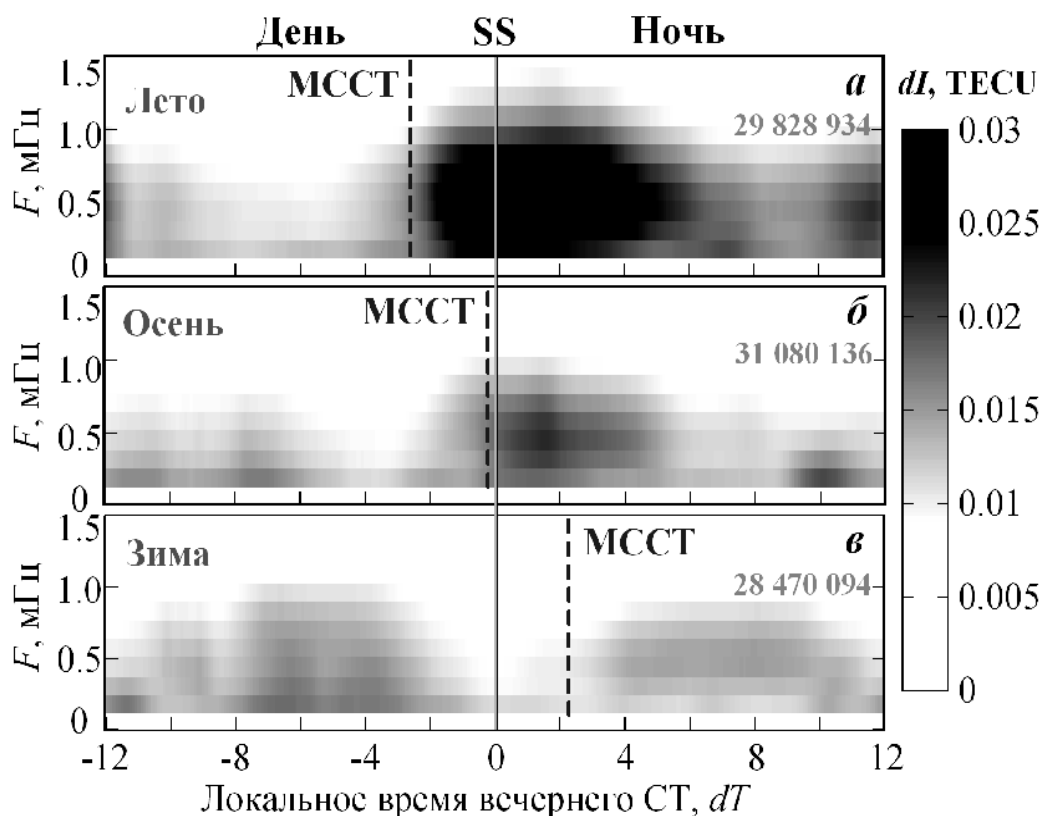


Рис. 5. Динамические спектры вариаций ПЭС над Японией летом (а), в равноденствие (б) и зимой (в).

Представленные спектры позволяют сделать вывод, что зимой в Северном полушарии СМ волновые возмущения наблюдаются преимущественно спустя три-четыре часа после прохождения вечернего СТ (рис. 5, в). В равноденствие они появляются после прохождения СТ без заметного запаздывания или опережения (рис. 5, б).

Наиболее важным является тот факт, что летом в Японии волновые возмущения начинают регистрироваться за полтора-два часа до появления СТ над точкой регистрации, но в момент прохождения вечернего СТ над магнитосопряженной точкой, расположенной в Австралии (рис. 5, а).

Данные наблюдения позволили предположить, что генерация наблюдаемых волновых возмущений имеет более сложную природу, нежели локальное воздействие АГВ. Известно, что АГВ и обусловленные ими ПИВ могут распространяться без значительного затухания и изменения своей формы или потери когерентности не далее, чем на три-пять длин волн, в случае СМ ПИВ это составляет (300–500 км [2]. Наблюдаемые нами возмущения среднего масштаба сохраняются на расстояниях, сравнимых с протяженностью Японских островов (~ 2000 км).

Наиболее сильный аргумент против модели АГВ волновых пакетов, по крайней мере для ночных наблюдений летом, – регистрация возмущений за 1.5 ч до прохождения терминатора над пунктом наблюдения. Сезонная зависимость и связь с процессами в магнитосопряженной точке указывают на электродинамическое происхождение волновых пакетов, по крайней мере регистрируемых до прихода

СТ. На такую связь указывают также данные одновременных оптических наблюдений периодических структур в ионосфере над Японией и Австралией [14, 15].

Высокая добротность колебательной системы и синхронизация с появлением СТ в магнитосопряженной области свидетельствуют о магнитогидродинамической природе генерации волновых возмущений солнечным терминатором.

В пятой главе приведены описания предполагаемых механизмов и моделей генерации волновых возмущений солнечным терминатором.

Связь регистрируемых волновых возмущений с прохождением терминатора в сопряженной по геомагнитному полю области ионосферы позволяет предположить, что они переносятся магнитосферными МГД-волнами. Вдоль магнитного поля распространяются либо альфвеновские, либо медленные магнитозвуковые (ММЗ) волны. Периоды наблюдаемых колебаний далеки от минимальных периодов собственных альфвеновских волн на этих широтах (~ 10 с), но вполне соответствуют периодам первых гармоник стоячих ММЗ-волн, распространяющихся вдоль силовых линий геомагнитного поля ($\sim 10^3\text{--}10^4$ с) [16]. В работе [16] сделан вывод, что ионосфера не может играть какой-либо роли ни в генерации, ни в поглощении ММЗ-волн. Вывод был основан на том, что все электромагнитные компоненты и поперечные компоненты колебаний плазмы на уровне ионосферы обращаются в нуль. Однако, как следует из той же работы, продольная компонента скорости колебаний плазмы на уровне ионосферы в нуль не обращается. Именно эта компонента колебаний ответственна за модуляцию электронной плотности, которая детектируется при регистрации полного электронного содержания.

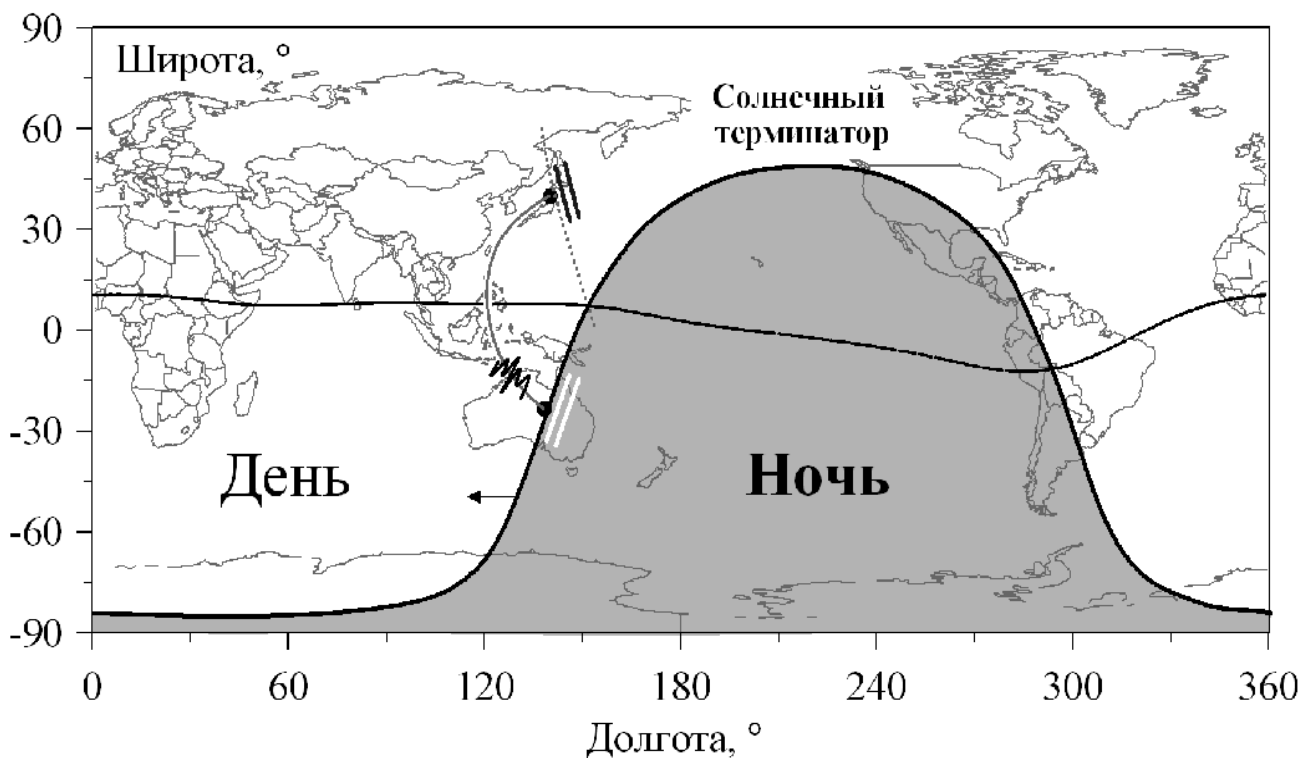


Рис. 6. Схема переноса колебаний по силовой трубке под действием вечернего терминатора.

На рис. 6 показана схема переноса колебаний плазмы вдоль силовой линии магнитного поля в Японию под действием вечернего терминатора, проходящего в Австралии над магнитосопряженной точкой.

В [17] было показано на основе моделирования, что в результате резкого нагрева, происходящего на восходе Солнца, образуется направленный по магнитосиловой линии восходящий поток плазмы. Локальное сжатие, происходящее на вершине силовой линии, вызывает генерацию акустических волн в плазме. На закате Солнца такие волны продуцируются резким охлаждением плазмы.

Следует заметить, что наблюдаемые волновые возмущения являются результатом сложного воздействия терминатора в магнитосопряженной и локальной областях. Достоверное разделение ионосферных эффектов данных воздействий в текущий момент затруднительно и не являлось целью настоящей работы.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные при работе над диссертацией:

1. На обширном статистическом материале показано наличие связи регистрации среднемасштабных волновых пакетов с прохождением СТ в магнитосопряженной области. Дано экспериментальное подтверждение теории, согласно которой перемещение СТ вызывает генерацию магнитогидродинамических волн.

2. По данным сети GEONET зафиксировано изменение начала времени регистрации среднемасштабных волновых пакетов с широтой в системе локального времени терминатора. Это свидетельствует в пользу гипотезы о наличии магнитогидродинамического механизма генерации волновых пакетов.

3. На основе анализа данных глобальной сети приемников GPS получено экспериментальное подтверждение генерации терминатором среднемасштабных волновых возмущений в ионосфере, проявляющихся в виде волновых пакетов в вариациях ПЭС. В среднем наибольшее число пакетов регистрируется после прохождения вечернего терминатора.

4. С использованием измерений ПЭС по данным глобальной сети GPS за период 1998–2008 гг. представлена морфология среднемасштабных волновых пакетов, генерируемых солнечным терминатором. Во временной области ВП представляют собой цепочки узкополосных колебаний ПЭС длительностью порядка 1–2 ч и общей длительностью до 6 ч с периодом колебаний в диапазоне 15–30 мин. Длина волны составляет порядка 100–300 км. Зимой в Северном полушарии среднемасштабные волновые пакеты наблюдаются преимущественно спустя три часа после прохождения вечернего солнечного терминатора. В равноденствие СМ ВП появляются после прохождения СТ практически сразу или с небольшим опережением. Летом СМ ВП регистрируются за два–три часа до появления вечернего СТ в пункте наблюдения. Начало наблюдения ВП совпадает с моментом прохождения СТ в магнитосопряженной области. Начало регистрации волновых пакетов в летнее время изменяется с широтой, однако также хорошо согласуется с моментом прохождения СТ в магнитосопряженной области. Пространственная структура СМ ВП характеризуется высокой степенью анизотропии и когерентности на расстоянии свыше 10 длин волн.

Публикации по теме диссертации

1. Афраймович Э.Л., Едемский И.К., Воейков С.В., Живетьев И.В., Ясюкевич Ю.В. Пространственно-временные характеристики перемещающихся ионосферных возмущений, генерируемых при движении солнечного терминатора // XXII Всеросс. науч. конф. «Распространение радиоволн. РРВ-22»: Труды конф. Ростов н/Д., 2008. Т. 1. С. 68–71.
2. Afraimovich E.L., Voeykov S.V., Edemsky I.K., Yasukevich Yu.V. Ionosphere wave packets excited by the solar terminator: AGW or MHD origin? // PIERs Proceedings. Moscow, Russia, August 18–23, 2009. Moscow, 2009. P. 233–237.
3. Afraimovich E.L., Edemsky I.K., Leonovich A.S., Leonovich L.A., Voeykov S.V., Yasukevich Yu.V. MHD nature of night time MSTIDs excited by the solar terminator // Geophys. Res. Let. 2009. V. 36. P. L15106.
4. Afraimovich E.L., Edemsky I.K., Voeykov S.V., Yasukevich Yu.V., Zhivet'ev I.V. Spatio-temporal structure of the wave packets generated by the solar terminator // Adv. Space Res. 2009. V. 44, N 7. P. 824–835.
5. Afraimovich E.L., Edemsky I.K., Voeykov S.V., Yasukevich Yu.V., Zhivet'ev I.V. The first GPS-TEC imaging of the space structure of MS wave packets excited by the solar terminator // Ann. Geophys. 2009. V. 27, N 4. P. 1521–1525.
6. Afraimovich E.L., Voeykov S.V., Edemsky I.K., Yasukevich Yu.V. The MHD nature of ionospheric wave packets excited by the solar terminator // <http://arxiv.org/abs/0904.3016>. 2009.
7. Афраймович Э.Л., Едемский И.К., Воейков С.В., Леонович А.С., Живетьев И.В. Динамические характеристики волновых пакетов, генерируемых солнечным терминатором (по данным японской сети GPS/GEONET) // IV Всеросс. науч. школа и конф. «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром, 30 июня – 3 июля 2009 г.: Труды. 2009. С. 44–48.
8. Афраймович Э.Л., Воейков С. В., Едемский И.К., Ясюкевич Ю.В. О магнитогидродинамической природе ионосферных волновых пакетов, генерируемых солнечным терминатором // Доклады академии наук. 2009. Т. 428, № 6. С. 805–809.
9. Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Едемский И.К., Ясюкевич Ю.В. МГД-природа среднемасштабных ионосферных волновых пакетов, генерируемых солнечным терминатором // Междунар. Байкальская молодеж. науч. школа по фундамент. физ. БШФФ-2009. Труды XI конференция молодых ученых «Гелио- и геофизические исследования». г. Иркутск, 7–12 сентября 2009 г. Иркутск, 2009. С. 81–83.
10. Афраймович Э.Л., Едемский И.К., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В. Перемещающиеся волновые пакеты, генерируемые солнечным терминатором в верхней атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22, № 8. С. 753–759.
11. Афраймович Э.Л., Едемский И.К., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В. МГД-природа ионосферных волновых пакетов, генерируемых солнечным

терминатор // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: V Международная конференция. с. Паратунка, Камчатский край, 2–7 августа 2010 г.: Сб. докладов. Петропавловск-Камчатский, 2010. С. 277–280.

12. Афраймович Э.Л., Едемский И.К., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В. МГД-природа ионосферных волновых пакетов, генерируемых солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50, № 1. С. 82–99.

13. Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Едемский И.К., Ясюкевич Ю.В. МГД-природа ионосферных волновых пакетов, генерируемых солнечным терминатором // Российская научная конференция «Зондирование земных покровов радаром с синтезированной апертурой». 06.09–10.09 2010 г., г. Улан-Удэ: Сб. докладов. 2010. С. 244–250.

14. Leonovich A.S., Kozlov D.A., Edemsky I.K. Standing slow magnetospheric waves in a dipole-like plasmosphere // Planet. Space Sci. 2010. V. 58, N 11. P. 1425–1506.

15. Едемский И.К., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В. Сезонные и широтные вариации параметров волновых возмущений МГД-природы, генерируемых солнечным терминатором // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 107–116.

16. Едемский И.К., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В. Волновые возмущения МГД-природы, генерируемые солнечным терминатором. Сезонные и широтные вариации их параметров // БШФФ-2011. Труды XII конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». С. 168–170.

Цитируемая литература

1. Hines C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Canadian J. Phys. 1960. V. 38, N 8. P. 1441–1481.

2. Francis S.H. A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 5245–5259.

3. Сомсиков В.М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата: Наука, 1983. 192 с.

4. Mishin E.V., Epishova A.E., Ishkova L.M., et al. Disturbances of F-region electron density following solar terminator during the WITS period of 16–20 March // J. Atmos. Terr. Phys. 1991. V. 53, N 6/7. P. 643–648.

5. Somsikov V.M., Ganguly B. On the mechanism of formation of atmospheric inhomogeneities in the solar terminator region // J. Atmos. Terr. Phys. 1995. V. 57. P. 75–83.

6. Dominici P., Cander L.R., Zolesi B. On the origin of medium-period ionospheric waves and their possible modeling: a short review // Annali di geofisica. 1997. V. 15, N 5. P. 1171–1178.

7. Galushko G., Paznukhov V.V., Yampolski Y.M., Foster J.C. Incoherent scatter radar observations of AGW/TID events generated by the moving solar terminator // Ann. Geophys. 1998. V. 16. P. 821–827.

8. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982–1995 // *Ann. Geophys.* 1996. V. 14. P. 917–940.
9. Афраимович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
10. Forbes J.M., Bruinsma S.L., Miyoshi Y., Fujiwara H. A solar terminator wave in thermosphere neutral densities measured by the CHAMP satellite // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35, P. L14802. doi:10.1029/2008GL034075.
11. Иванов В.П., Карвецкий В.Л., Коренькова Н.А. Сезонно-суточные вариации в параметрах среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1987. Т. 27, № 3. С. 511.
12. Afraimovich E.L., Perevalova N.P., Voeikov S.V. Traveling wave packets of total electron content disturbances as deduced from global GPS network data // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2003. V. 65, N 11/13. P. 1245–1262.
13. Tsyganenko N.A. GEOPACK: A set of Fortran subroutines for computations of the geomagnetic field in the Earth's magnetosphere // <http://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/Geopack-2008.doc>.
14. Ogawa T., Balan N., Otsuka Y., et al. Plasmaspheric electron content in the GPS ray paths over Japan // *Earth Planets Space*. 2002. V. 54. P. 45–56.
15. Otsuka Y., Shiokawa K., Ogawa T., Wilkinson P. Geomagnetic conjugate observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances at midlatitude using all-sky airglow imagers // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. P. L15803. doi:10.1029/2004GL020262.
16. Leonovich A.S., Kozlov D.A., Pilipenko V.A. Magnetosonic resonance in a dipole-like magnetosphere // *Annales Geophys.* 2006. V. 24. P. 2277–2289.
17. Huba J.D., Joyce G., Fedder J.A. Ion sound waves in the topside low latitude ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 3181–3184.