

Российская Академия Наук
Дальневосточное отделение
Институт космофизических исследований
и распространения радиоволн

На правах рукописи

УДК 550.388.2

Живетьев Илья Валерьевич

**Ионосферные возмущения
на различных фазах 23-го цикла солнечной активности по
данным глобальной сети GPS**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск-2007

Диссертация выполнена в Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук,
профессор Афраймович Эдуард Леонтьевич

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,
профессор Пономарев Евгений Александрович

Доктор физико-математических наук,
профессор Попов Георгий Васильевич

Ведущая организация:

Томский государственный университет

Защита состоится 22 мая 2007 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 003.034.01 при Институте солнечно-земной физики СО РАН (664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126, ИСЗФ СО РАН).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЗФ СО РАН

Автореферат разослан “ ” апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.



Поляков В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время внимание исследователей приковано к изучению геофизических явлений, предшествующих и сопровождающих кризисные процессы (землетрясения, цунами). Эти исследования имеют особое значение для своевременного предсказания катастроф. Однако, несмотря на все научные изыскания, до сих пор нет основы для создания надежной технологии их прогноза. Одной из причин низкой результативности является то, что чаще всего такие исследования проводятся только для региона, где произошло или ожидается катастрофическое явление, и охватывают небольшие промежутки времени вокруг таких событий.

Между тем, начиная с классических работ академика Вернадского [2], в мировой литературе все большее число публикаций посвящено разработке предложенной им концепции изучения геофизических явлений как единого процесса взаимодействия геосфер – литосферы, атмосферы, ионосферы, магнитосферы, межпланетной среды и Солнца, составляющих единую систему Солнце–Земля. Одной из геосфер, наиболее чувствительных к процессам, сопровождающим катастрофические явления в твердой земле и атмосфере, является ионосфера.

Исходя из концепции геосфер, исследованию подлежит не только регион, где произошла катастрофа, но и вся система геосфер в целом, и не только непосредственно перед событием, но и на протяжении длительного интервала времени до него. Реализация подобного подхода в экспериментальном плане требует высокого пространственно-временного разрешения средств мониторинга процессов в системе геосфер. Так, состояние атмосферы во многом зависит как от динамики цикла солнечной активности, так и от целого спектра возмущений среды в широком диапазоне периодов – от месяцев до минут. В пространственном измерении необходим анализ широкого диапазона масштабов – от системы геосфер в целом до детальных региональных особенностей. Существующие ранее системы мониторинга не удовлетворяли этим требованиям.

В настоящее время ситуация существенным образом меняется. Появилось множество наземных и спутниковых систем мониторинга окружающей среды (параметров солнечной активности, электромагнитного и корпускулярного излучения Солнца, солнечного ветра, магнитосферы, атмосферы, процессов в литосфере). В распоряжении ученых появились доступные в сети Интернет и удобные для анализа цифровые данные за много лет (вплоть до нескольких солнечных циклов). Гигантский объем этих данных требует для своего анализа адекватного подхода, основанного на концепции геосфер.

Одним из наиболее катастрофических явлений являются землетрясения (ЗТ), сопровождающиеся разрушением земной поверхности и образованием цунами. Проведено множество исследований откликов атмосферы и ионосферы на процессы, инициируемые главным толчком ЗТ. Результаты этих исследований нельзя непосредственно использовать для прогноза, однако они необходимы для

изучения всего комплекса литосферно-ионосферных явлений, без понимания которого невозможно решить проблему прогнозирования.

На протяжении многих лет огромные усилия исследователей предпринимаются для поисков научного обоснования построения системы предсказания ЗТ на основе мониторинга состояния геосфер. Существует множество указаний на различные признаки готовящихся ЗТ в изменении **локальных** параметров нейтральной и заряженной компонент ионосферы, а также в акустическом и электромагнитном поле излучения эпицентров будущих ЗТ. Считается, что на ускорение подготовки ЗТ могут влиять различные **глобальные** проявления динамики солнечной активности, обусловленные регулярными изменениями в течение солнечного цикла, а также вспышками, выбросами корональной массы, вызывающими магнитные и ионосферные бури [8, 9]. Обсуждается гипотеза о том, что не только литосферные процессы могут быть источником ионосферных (атмосферных) возмущений, но и глобальные изменения в атмосфере сами влияют на характер протекания литосферных процессов, при этом атмосферные катаклизмы могут служить «пусковым» механизмом высвобождения сейсмической энергии [7]. Эта гипотеза также требует надежных экспериментальных доказательств.

В настоящее время широкое распространение получили исследования литосферно-ионосферных процессов на основе изучения возмущений полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере Земли, регистрируемых при зондировании ионосферы сигналами современных спутниковых навигационных систем – американской GPS и российской ГЛОНАСС.

В некоторых работах [5, 12] отмечено отклонение от регулярного суточного хода ПЭС вблизи эпицентра ЗТ за несколько часов и дней до главного толчка. Предпринимались неоднократные попытки обнаружить в вариациях ПЭС предсказанное теорией изменение спектра возмущений ионосферной плазмы, обусловленное генерацией в районе эпицентра акустико-гравитационных волн (АГВ) [10], которые регистрируются в форме перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Однако до сих пор не получено надежных свидетельств подготовки катастрофических землетрясений по вариациям ПЭС, как, впрочем, и по другим характеристикам сигналов радиофизических средств мониторинга сейсмоопасных районов.

Для надежной идентификации признаков подготовки ЗТ необходимо хорошо знать глобальные и локальные характеристики «фоновых» возмущений ПЭС, обусловленных изменениями солнечной и геомагнитной активности. Эта проблема составляет **предмет** настоящей диссертации.

В диссертации изучение **глобальных** свойств ионосферы основано на концепции глобального электронного содержания (ГЭС), предложенной в 2005 г. Э.Л. Афраймовичем. Основное внимание в изучении **локальных** характеристик уделено Камчатскому региону. Сейсмическая деятельность у Тихоокеанского побережья Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии достигает наивысшего на Земле уровня. В районе Камчатского залива и Командорских островов расположена область стыка Курило-Камчатской и

Алеутской островных дуг, которая относится к наиболее важным и интересным тектоническим узлам мира. Сюда подходит и крупный подводный хребет Императорских гор. В этом районе находится самое резкое пересечение глубоководных желобов в мире, а также один из магматических центров мира – Ключевская группа вулканов.

Экспериментальную основу работы составляют данные глобальной и региональной Камчатской сетей двухчастотных многоканальных приемников сигналов навигационной системы GPS, а также необходимая для исследования информация о геофизических и гелиофизических процессах.

Целью работы является исследование характеристик ионосферных возмущений на различных фазах 23-го цикла солнечной активности по данным глобальной и региональной Камчатской сетей двухчастотных GPS-приемников.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработка программно-алгоритмического комплекса, предназначенного для определения глобального электронного содержания по данным международной сети GPS и его моделирования с использованием ионосферной модели IRI-2001.
2. Формирование базы данных глобальной и региональной Камчатской сетей GPS за период 1996–2006 гг., необходимой для изучения динамики глобального электронного содержания и фоновых перемещающихся ионосферных возмущений.
3. Исследование динамики глобального электронного содержания в течение 23-го цикла солнечной активности в сравнении с динамикой ультрафиолетового излучения и радиоизлучения Солнца.
4. Исследование глобальных характеристик крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (КМ ПИВ), генерируемых в авроральной зоне во время мощных магнитных бурь.
5. Исследование зависимости пространственно-временных характеристик относительной амплитуды перемещающихся ионосферных возмущений от местного времени, уровня геомагнитной и солнечной активности.

Научная новизна исследования:

1. Впервые разработаны метод и программы для определения нового ионосферного параметра – глобального электронного содержания, отличающегося от известных локальных параметров большим соответствием отображения глобальных характеристик ионосферы. При анализе данных за 23-й цикл солнечной активности получены уточненные параметры связи динамики ионосферы, индекса солнечной активности F10.7 и потока УФ-излучения Солнца.

2. Впервые установлено, что относительная амплитуда волновых возмущений полного электронного содержания меняется пропорционально значению планетарного индекса K_p . При низком уровне геомагнитной активности относительная амплитуда ночных вариаций ПЭС существенно превышает дневные. Во время магнитных бурь геомагнитный контроль относительной амплитуды вариаций ПЭС на высоких и средних широтах оказывается более существенным, чем регулярные суточные изменения.
3. Впервые для определения фазовой скорости и формы волнового фронта крупномасштабных возмущений в различных долготных секторах Северного полушария использованы пять наборов GPS-станций, максимально распределенных по широте, включая Камчатскую региональную сеть. Получено экспериментальное доказательство существования крупномасштабных возмущений с кольцевой формой волнового фронта.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обусловлена использованием физически обоснованных методов и представительной статистикой наблюдений. Полученные в экспериментах 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 в диссертации методы могут быть полезны при изучении процессов ионизации атмосферы ультрафиолетовым излучением Солнца и использованы для корректировки ионосферных моделей, в том числе моделей ионосферных неоднородностей геомагнитного и сейсмического происхождения.

Личный вклад автора

Основные результаты работы являются оригинальными и получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии.

Автору принадлежат:

1. Разработка методов и программных средств определения глобального электронного содержания с помощью глобальных ионосферных карт и ионосферной модели IRI-2001.
2. Создание и обработка баз данных глобальной и Камчатской сетей приемников GPS за 1996–2006 гг.
3. Исследование динамики и формы волнового фронта крупномасштабных волновых возмущений, генерируемых во время мощных магнитных бурь, по данным пяти меридиональных цепочек GPS-станций.

4. Комплексное исследование пространственно-временных характеристик абсолютной и относительной амплитуды вариаций ПЭС в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях в период с 1999 по 2005 г.

5. Исследование ионосферного отклика на главный толчок Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г.

Автор принимал непосредственное участие в разработке концепции глобального электронного содержания по данным измерений ПЭС на глобальной сети GPS и моделировании с использованием модели IRI-2001, в сравнении вариаций глобального электронного содержания с вариациями потока ультрафиолетового излучения Солнца и индекса солнечной активности F10.7.

Апробация работы

Основные результаты и выводы, приведенные в диссертации, докладывались на Байкальской научной молодежной школе по фундаментальной физике БШФФ-2004, БШФФ-2005, БШФФ-2006, Иркутск; XXI Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, 2005; III международной конференции «Солнечно-Земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений», с. Паратунка, Камчатская обл., 2004; XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science (URSI), New Delhi, 2005; VI международной конференции “Problems of Geocosmos”, С-Петербург, май 2006; Международной конференции IGS-2006, Дармштадт, Германия, май 2006; Международной школе по космической погоде, Триест, Италия, май 2006; XIII международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Атмосферная физика», Томск, ИОА СО РАН, июль 2006; 36-ой сессии COSPAR, Пекин, Китай, июль 2006; IRI 2006 Workshop, Buenos Aires, октябрь 2006; 3 европейской неделе по космической погоде, Брюссель, ноябрь 2006; 30-м Апатитском семинаре «Физика авроральных явлений», Апатиты, февраль 2007.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новый ионосферный параметр – глобальное электронное содержание, отличающийся от известных параметров в большем соответствии с отображением глобальных характеристик ионосферы в эксперименте и моделировании; метод определения и программный комплекс. Уточненные параметры связи динамики ионосферы, индекса солнечной активности F10.7 и потока УФ-излучения Солнца во время 23-го солнечного цикла.
2. Пропорциональная зависимость относительной амплитуды волновых возмущений полного электронного содержания от значения планетарного индекса K_p и преобладание геомагнитного контроля амплитуды этих вариаций на высоких и средних широтах над регулярной суточной зависимостью во время магнитных бурь.

3. Экспериментальное доказательство существования крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений с кольцевой формой волнового фронта, полученное при анализе данных глобальной сети станций GPS.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и библиографического указателя, содержащего 183 ссылки. Общий объем диссертации – 187 страниц, включая 6 таблиц и 53 рисунок.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** описан рассматриваемый в диссертации спектр ионосферных возмущений и современные методы их диагностики. Приведены общие сведения о спутниковой радионавигационной системе GPS и глобальной сети двухчастотных GPS-приемников, на основе которой осуществляется мониторинг возмущений. Изложен метод определения полного электронного содержания по данным двухчастотных фазовых измерений в системе GPS, метод измерения скорости и направления перемещения ионосферных возмущений с использованием решеток GPS-станций. Дано описание технологии построения глобальных карт абсолютного «вертикального» ПЭС (GIM-карт) по данным международной сети GPS-станций.

Во **второй главе** дано описание разработанного в диссертации метода вычисления глобального электронного содержания на основе использования экспериментальных данных и моделирования (раздел 2.1). Метод основан на использовании GIM-карт [14], вычисляемых по данным международной сети приемников GPS в нескольких научных центрах (JPL, США; CODE, Швейцария и др.). Для моделирования использовалась ионосферная модель IRI-2001. Приводится краткое описание программного комплекса GREC, который позволяет рассчитывать ГЭС на основе эмпирических и модельных входных данных для различных фаз цикла солнечной активности.

Пространственный диапазон карт GIM в стандартном формате IONEX – $\pm 180^\circ$ по долготе и $\pm 90^\circ$ по широте; размер элементарной ячейки GIM – 5° по долготе и 2.5° по широте; общее количество ячеек GIM равно 5184. Для каждого момента времени с двухчасовым временным разрешением из файлов IONEX известны значения вертикального ПЭС I_{ij} , где индексы i, j указывают на координаты (широту и долготу) ячейки GIM. Глобальное электронное содержание $G(t)$ вычисляется путем суммирования по всем ячейкам GIM значений ПЭС, умноженных на площадь соответствующей ячейки GIM:

$$G = \sum I_{i,j} \cdot S_{i,j} \quad (1)$$

Значения ГЭС на основе IRI-2001 определялись в два этапа: сначала рассчитывались значения ПЭС по всему земному шару в узлах широтно-долготной сетки с шагом 5° по долготе и 2.5° по широте с временным шагом 2 часа, затем полученные модельные значения ПЭС суммировались с использованием формулы (1). Итогом являлась временная зависимость смоделированных значений ГЭС $M(t)$. Для оценки значений ГЭС в диссертации предложена единица измерения $GECU = 10^{32}$ электронов.

В разделах 2.2, 2.3 рассмотрена динамика ГЭС в течение 23-го цикла солнечной активности и сравнение эксперимента с результатами моделирования. Временная зависимость ГЭС $G(t)$ за 1996–2006 гг. (рис. 1а, черная кривая) демонстрирует существенную изменчивость – от 0.5 до 3.2 GECU. Сравнение с вариациями числа солнечных пятен R_{sn} и с индексом солнечной активности F10.7 $F(t)$, равным потоку солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см в единицах с.е.п. (10^{-22} Вт·м⁻²·Гц⁻¹), показало, что зависимость $G(t)$ адекватно отражает влияние изменения солнечной активности на ионосферу. Особенно четко это видно при сравнении зависимостей $G(t)$, $F(t)$ и $R_{sn}(t)$, сглаженных с годовым временным окном (рис. 1б). Сглаженные ряды экспериментальных $G(t)$ и модельных $M(t)$ значений ГЭС (рис. 1б), демонстрируют хорошее соответствие. Среднее значение относительного отклонения $[G(t)-M(t)]/G(t)$, %, между сглаженными рядами $G(t)$ и $M(t)$ для данного периода не превышают 1.5%, среднеквадратичное отклонение (СКО) в пределах 5%.

Регрессионная зависимость ГЭС от индекса F10.7 за период 1998–2006 гг. демонстрирует линейную зависимость со значительным разбросом (СКО 50%) при относительно малых значениях F10.7 и тенденцию к насыщению при высоких значениях F10.7 (рис. 2б). Это согласуется с результатами, полученными в работе [13] при анализе длинных рядов суточных значений F10.7 и значений электронной концентрации NmF2 в максимуме F2-слоя, измеренных на 20 ионосферных станциях. Авторы [13] обнаружили эффект насыщения NmF2 при высоких значениях F10.7. В то же время значения ГЭС и потока УФ-излучения Солнца в диапазоне длин волн 0.1–50 нм за период 1996–2006 гг. связаны линейной зависимостью с незначительным разбросом (СКО около 20%; рис. 2а).

В диссертации установлено, что для ГЭС характерны сильные сезонные вариации с относительной амплитудой от 10% на подъеме и спаде солнечной активности до 30% в период максимума. Это иллюстрируют представленные на рис. 1в вариации относительной амплитуды $dG(t)/G(t)$ (черная кривая), отфильтрованные в диапазоне периодов от 100 до 300 дней.

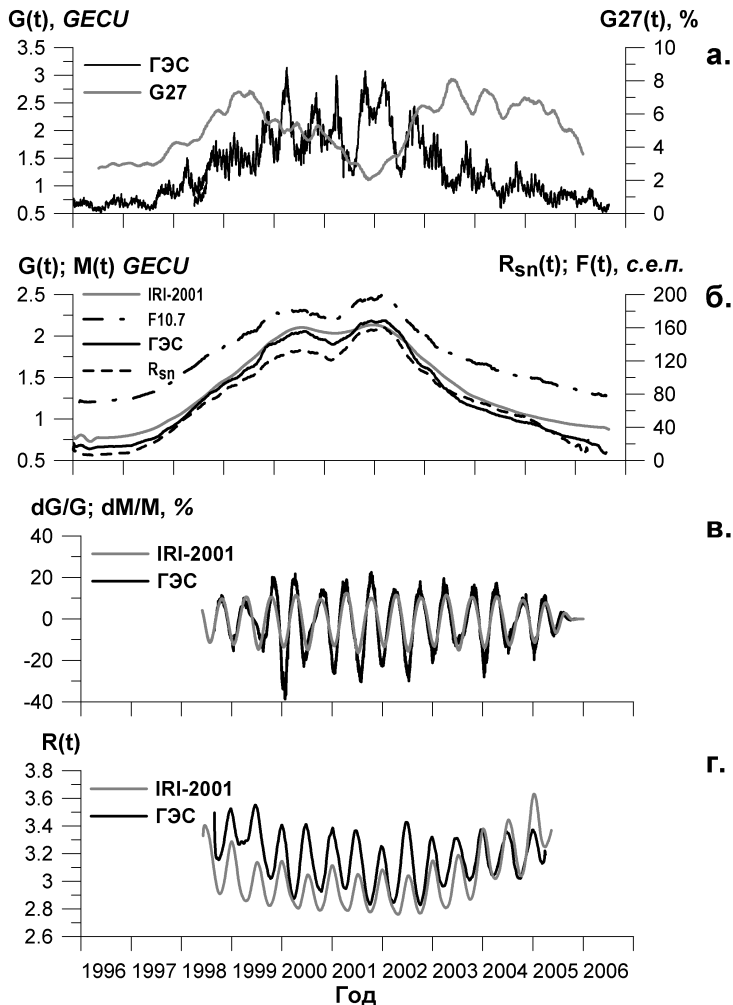


Рис. 1. **а** – вариации экспериментальных значений ГЭС (черная кривая), относительной амплитуды 27-дневных вариаций ГЭС (серая кривая); **б** – сглаженные с годовым временным окном вариации экспериментальных (черная кривая) и расчетных (серая кривая) значений ГЭС, индекса F10.7 и относительного числа солнечных пятен R_{sn} ; **в** – сезонные вариации экспериментальных (черная кривая) и расчетных (серая кривая) значений ГЭС; **г** – отношение $R(t)$ значений ГЭС дневной стороны Земли к значениям ГЭС ночной стороны (экспериментальные значения – черная кривая, расчетные – серая кривая).

Максимальные значения сезонных вариаций ГЭС приходятся на периоды равноденствия; это вполне согласуется с тем, что плотность нейтральной атмосферы и значения электронной концентрации максимальны в апреле и октябре [1]. Для рядов $M(t)$ также характерны полугодовые колебания (рис. 1в – серая кривая), однако сезонные вариации экспериментальных и модельных рядов ГЭС находятся не в фазе. Так, разница между моментами времени максимумов экспериментальных значений ГЭС и данных моделирования достигает 20–40 дней.

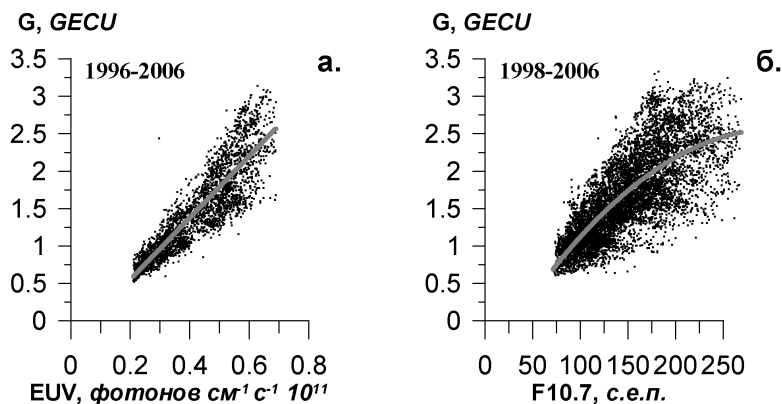


Рис. 2. Регрессионные зависимости значений ГЭС от УФ (а) и значений ГЭС от индекса F10.7 (б); аппроксимирующие зависимости показаны серыми кривыми.

Для понимания глобальных ионосферных процессов важны оценки отношения дневной и ночной ионизации. Анализ отношения R значений ГЭС дневной стороны Земли к ГЭС ночной стороны показал, что временная зависимость $R(t)$ испытывает сильные сезонные вариации с максимумами в периоды солнцестояния. На рис. 1г изображены ряды экспериментальных $R_G(t)$ и модельных $R_M(t)$ данных, сглаженных с временным окном 81 день. В периоды роста и максимума солнечной активности диапазон изменения и среднее значение вариаций $R_M(t)$ заметно меньше (от 2.7 до 3.1 и 2.9 соответственно), чем соответствующие значения $R_G(t)$ (от 2.8 до 3.5 и 3.2). Это означает, что в модели IRI-2001 степень ионизации ночной стороны завышена. Кроме того, сезонные вариации экспериментальных и модельных рядов отношения R находятся не в фазе.

Одним из важных факторов влияния солнечного излучения на ионосферу является 27-дневная цикличность, обусловленная вращением Солнца. Однако 27-дневная модуляция ионосферных параметров, измеренных в одном пункте, маскируется множеством других факторов, что затрудняет получение достоверных количественных характеристик. ГЭС более отчетливо отражает эту особенность динамики ионосферы (раздел 2.2.4). На рис. 3а–в показаны 27-дневные вариации $dG(t)$, $dF(t)$, $dU(t)$, полученные с помощью фильтрации

исходных рядов ГЭС $G(t)$, индекса F10.7 $F(t)$ и потока УФ излучения $U(t)$ в диапазоне периодов 20–40 дней. Для иллюстрации выбран период, который включает октябрь–ноябрь 2003 г., когда были зарегистрированы сильные гелиосферные возмущения [3].

Корреляционный анализ данных для периода 1999–2006 гг. выявил высокую степень подобия 27-дневных вариаций рядов $dG(t)$, $dF(t)$ и $dU(t)$. Коэффициент корреляции между рядами $dG(t)$ и $dU(t)$ достигает 0.94, между $dG(t)$ и $dF(t)$, а также $dF(t)$ и $dU(t)$ несколько ниже – 0.83 и 0.79 соответственно. Установлено, что 27-дневные вариации ГЭС запаздывают в среднем на два дня по сравнению с соответствующими вариациями F10.7 и УФ (рис. 3б). Однако разброс между рядами ГЭС и F10.7 существенно больше разброса между ГЭС и УФ.

На рис. 3г (и 3а) представлены зависимости огибающей (касательной к максимумам) 27-дневных вариаций $dG(t)$, $dF(t)$ и $dU(t)$, показанных на рис. 3а–в. В начале активного периода интенсивность 27-дневных вариаций F10.7, УФ и ГЭС начала возрастать практически синхронно, с разницей в несколько дней. Спад интенсивности вариаций $dG(t)$ и $dU(t)$ также синхронен, однако наблюдается запаздывание около 30 дней относительно вариаций $dF(t)$. Это запаздывание может быть связано с разницей между скоростью угасания яркости локальных источников на Солнце в УФ- и радиодиапазоне, а также с различными условиями «видимости» образований на лимбе Солнца, когда область генерации УФ-излучения находится уже за лимбом, а соответствующая область радиоизлучения еще не затемнена Солнцем [16].

На рис. 1а серой кривой показана временная зависимость огибающей 27-дневных вариаций ГЭС $G_{27}(t)$, сглаженная с годовым временным окном. Максимальное отклонение относительной амплитуды $G_{27}(t)$ меняется от 8% на подъеме и спаде солнечной активности до 2% в периоды максимума. Такая закономерность обусловлена особенностями активных образований на поверхности Солнца, число которых возрастает с увеличением солнечной активности [6, 15], при этом относительная амплитуда 27-дневной модуляции потока ультрафиолетового излучения уменьшается. Напротив, в периоды роста и особенно спада солнечной активности на поверхности Солнца образуется несколько интенсивных активных образований, которые могут существовать в течение нескольких оборотов Солнца [6, 15], вызывая глубокую модуляцию потока УФ-излучения.

В разделе 2.2.5 приведены результаты исследования динамики регионального электронного содержания (РЭС) на протяжении 23-го цикла солнечной активности. РЭС рассчитывалось для трех поясов: экваториального и двух среднеширотных в Северном и Южном полушариях ($\pm 30^\circ$ и от 30° до 65° геомагнитной широты соответственно).

В отличие от ГЭС, для северного и южного среднеширотных регионов амплитуда годовой вариации РЭС превышает размах сезонных вариаций почти в два раза. Отношение $R(t)$ РЭС дневной стороны Земли к ночной на экваторе в 1.5

раза ниже, чем для ГЭС, что свидетельствует о более высокой степени ночной ионизации, особенно в период максимума солнечной активности.

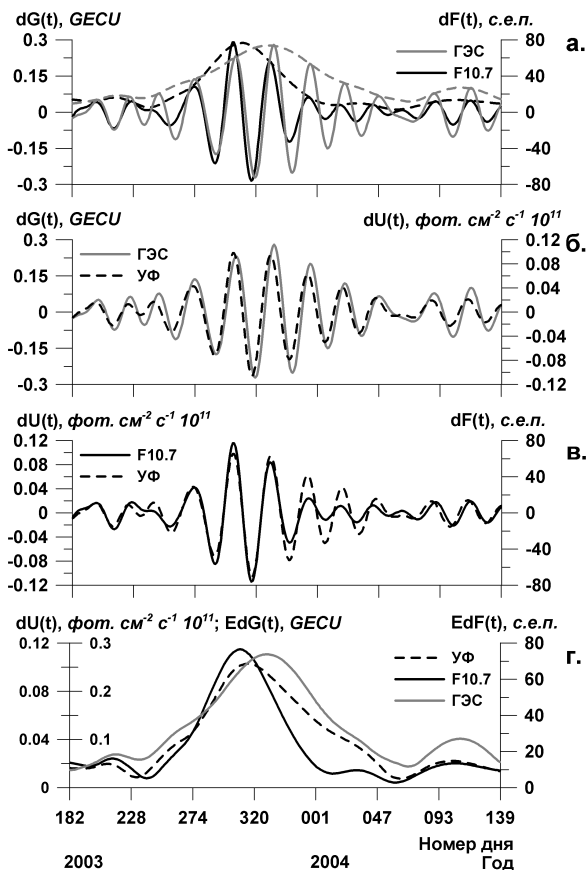


Рис. 3. 27-дневные вариации ГЭС и индекса F10.7 (а), ГЭС и УФ (б), УФ и F10.7 (в); огибающая 27-дневных вариаций ГЭС, индекса F10.7 и УФ (г).

Для средних широт характерен выраженный годовой цикл с максимальным значением $R(t)$ около 8.0 для Южного полушария зимой и для Северного полушария летом. Такие изменения могут быть связаны с естественным годовым циклом освещенности полушарий.

В **третьей главе** представлены результаты исследования ионосферных возмущений, обусловленных сейсмической и геомагнитной активностью.

В разделе 3.1. для оценки потенциальной возможности регистрации эффектов сейсмо-ионосферного взаимодействия было проведено исследование ионосферного отклика на Кроноцкое ЗТ, которое произошло 5 декабря 1997 г. в 11:26 UT у Тихоокеанского побережья Камчатки. Это самое сильное

землетрясение в данном районе, зарегистрированное за время детальных сейсмологических наблюдений, его магнитуда составила $M=7.9$ [4]. Тем не менее, впервые проведенный в диссертации анализ данных Камчатской региональной сети GPS показал, что амплитуда ионосферного отклика на главный толчок ЗТ в виде вариаций ПЭС с характерным периодом около 500 с не превышала 0.02 TECU ($10^{16} \text{ м}^{-2} \text{ эл.}$), что близко к уровню фоновых вариаций ПЭС.

Для оценки потенциала обнаружения возможных предвестников ЗТ проведено исследование основных характеристик относительной амплитуды вариаций ПЭС при различных уровнях геомагнитной и солнечной активности. Исследование проводилось для 12 спокойных дней (индекс $K_p < 3$) и 40 возмущенных суток ($K_p > 3$), в период с 1999 по 2005 г. Для получения статистически значимых результатов были выбраны три широтных региона, представленных в сети Интернет наибольшим количеством GPS-станций: высокоширотный ($50\text{--}80^\circ \text{ N}$, $200\text{--}300^\circ \text{ E}$; географические координаты; 59 станций); среднеширотный ($20\text{--}50^\circ \text{ N}$, $200\text{--}300^\circ \text{ E}$; 817 станций) и экваториальный ($\pm 20^\circ \text{ N}$, $0\text{--}360^\circ \text{ E}$; 76 станций).

На первом этапе обработки данных значения «наклонного» ПЭС $I_s(t)$, вычисленные на основе представленных в сети Интернет RINEX-файлов, преобразуются в соответствующие «вертикальные» значения $I_v(t)$. В результате фильтрации рядов $I_v(t)$ в диапазонах периодов, соответствующих КМ ПИВ ($20\text{--}60$ мин) и среднemasштабным (СМ) ПИВ ($2\text{--}10$ мин), получают вариации абсолютного значения ПЭС $\delta I(t)$. Затем вычисляются среднее значение $I_{m,n} = \langle I_v \rangle$ и среднеквадратичное отклонение (СКО) вариаций ПЭС $dI_{m,n} = \langle (\delta I)^2 \rangle^{1/2}$ для всех рядов $I_v(t)_{m,n}$ и $\delta I(t)_{m,n}$, полученных для всех m станций GPS и для всех n ИСЗ, видимых с данной станции в течение выбранного интервала времени; общее число рядов составило около 10^6 . Относительная амплитуда вариаций ПЭС $(dI/I)_{m,n}$ определяется путем нормировки величины СКО на фоновое значение I_0 , в качестве которого используется значение абсолютного вертикального ПЭС, полученное по GIM-картам.

Для выбранной территории значения $I_{m,n}$, $dI_{m,n}$ и $dI/I_{m,n}$ усреднялись с целью получения средних значений ПЭС $\langle I \rangle$, абсолютной $\langle dI \rangle$ и относительной амплитуд $\langle dI/I \rangle$ вариаций ПЭС в диапазоне периодов КМ ПИВ и СМ ПИВ. Среднее число рядов вариаций ПЭС с хорошим качеством данных за сутки составляло не менее 18000.

На рис. 4 изображены вариации $\langle dI/I \rangle$ относительной амплитуды вариаций ПЭС в течение дня, когда наблюдалась магнитная буря 30.10.2003 (слева, суммарное значение $K_p = 56$), а также суммарные суточные зависимости усредненных значений $\langle dI/I \rangle$ для 12 спокойных дней (справа, $K_p < 3$). Зависимости $\langle dI/I \rangle$ для СМ ПИВ показаны тонкими линиями, для КМ ПИВ – жирными. При низком уровне геомагнитной возмущенности относительная амплитуда возмущений ночью существенно превышает дневные значения: на экваторе (рис. 4г) и высоких широтах (рис. 4е) в 3–5 раз, на средних широтах (рис. 4д) – в 2 раза.

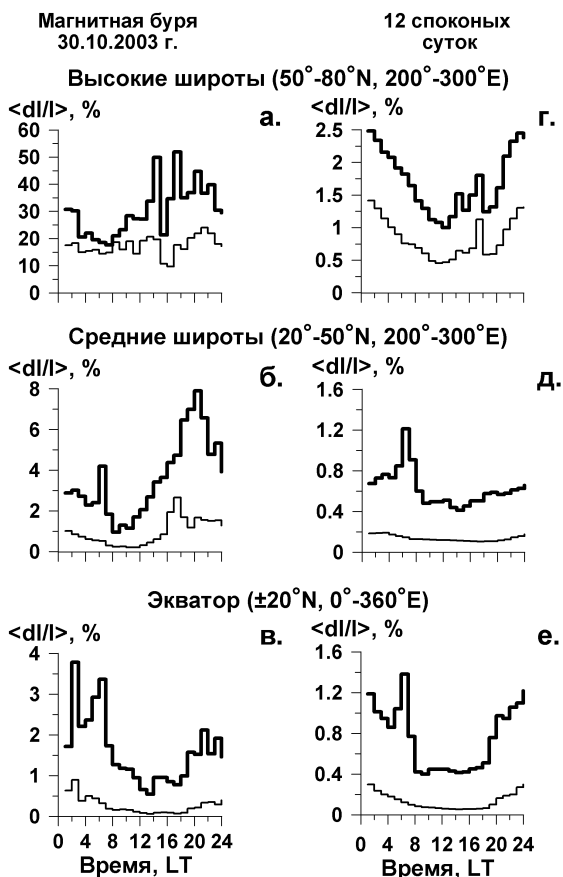


Рис. 4. Вариации относительной амплитуды вариаций ПЭС во время магнитной бури 30.10.2003 г. (а-в) и суммарные суточные зависимости относительной амплитуды для 12 спокойных дней (г-е). Шкала местного времени соответствует долготе 255° E.

В возмущенных условиях отмеченная закономерность суточного хода относительной амплитуды вариаций ПЭС нарушается, если главная фаза магнитной бури приходится на местное дневное время, как это произошло 30.10.2003 г. (рис. 4а-в). Таким образом, геомагнитный контроль амплитуды вариаций ПЭС на высоких и средних широтах оказывается более существенным, чем регулярные суточные изменения. Этот вывод согласуется с полученными ранее результатами [11]. На экваторе амплитуда возмущений слабо зависит от уровня геомагнитной активности (рис. 4в).

На рис. 5 представлены регрессионные зависимости относительной амплитуды КМ вариаций ПЭС от значений индекса K_p (а-в) и от индекса F10.7 (г-е), точками показаны усредненные в интервале 3 ч значения $\langle dI/I \rangle$, линиями –

аппроксимирующие прямые. В среднем относительная амплитуда вариаций ПЭС пропорциональна значению геомагнитного индекса K_p ; наиболее выражена эта зависимость на высоких широтах (коэффициент пропорциональности $k=0.37$), слабее на средних широтах ($k=0.2$) и меньше всего на экваторе ($k<0.1$). Следует заметить, что средние значения относительной амплитуды КМ- и СМ-возмущений получены при усреднении по большой территории и по всем «видимым» в данный интервал времени ИСЗ GPS. Как следствие, среднее значение $\langle dI/I \rangle$ существенно ниже максимально возможной амплитуды возмущений.

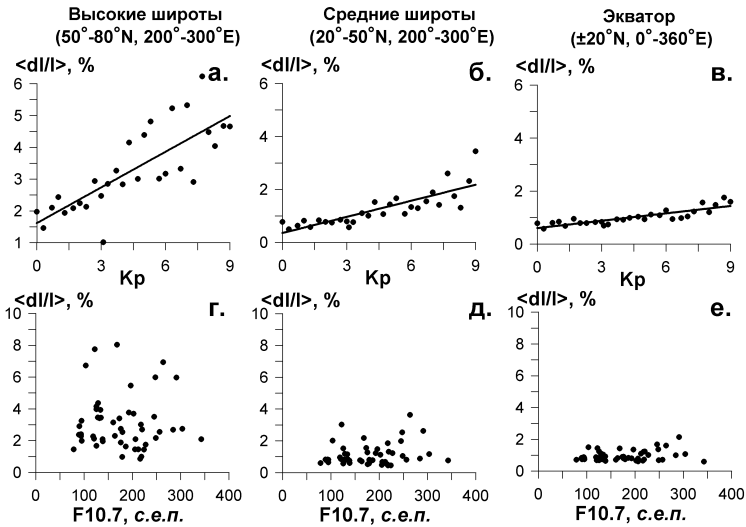


Рис. 5. Регрессионные зависимости относительной амплитуды КМ-вариаций ПЭС от значений индекса K_p (а–в) и от индекса $F10.7$ (г–е).

На рис. 5 (панели г–е) видно, что интенсивность относительной амплитуды вариаций ПЭС практически не зависит от индекса солнечной активности $F10.7$. Это может быть связано с тем, что абсолютное значение индекса $F10.7$ является показателем уровня фонового УФ-излучения Солнца и может быть низким или высоким вне зависимости от степени возмущенности геомагнитного поля. С другой стороны, как в периоды высокой солнечной активности могут быть магнитоспокойные дни, так и в периоды низкой активности, хотя и реже, регистрируются магнитные бури. Основные механизмы генерации или усиления интенсивности ионосферных неоднородностей связаны с возмущениями магнитного или электрического полей, которые возникают чаще всего во время геомагнитных возмущений, уровень которых характеризуется планетарным индексом K_p , но не абсолютным значением индекса $F10.7$. Поэтому амплитуда вариаций ПЭС практически не зависит от этой величины.

Таким образом, фоновые ионосферные возмущения геомагнитного происхождения могут оказаться основным препятствием для обнаружения относительно слабых волновых возмущений, предположительно генерируемых на стадии подготовки ЗТ [10].

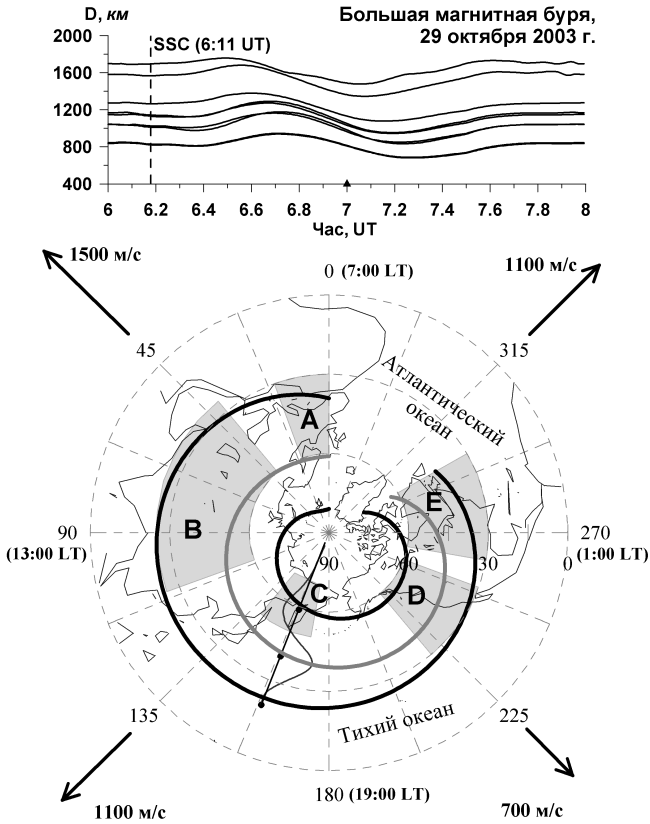


Рис. 6. Пространственное распределение положения минимумов и максимумов крупномасштабных вариаций ПЭС.

С другой стороны, КМ ПИВ большой амплитуды, сравнимой с суточными изменениями ПЭС, могут маскировать возможные отклонения от нормального суточного хода, с которыми связывают процессы подготовки ЗТ [12]. Такие возмущения возникают в авроральной зоне во время резких и глубоких изменений напряженности магнитного поля Земли во время мощных магнитных бурь. Предполагается, что форма фазового фронта таких возмущений близка к кольцевой, однако до сих пор не было получено надежных экспериментальных доказательств справедливости этой гипотезы. Для решения этой задачи

необходимо высокое пространственно-временное разрешение и максимально широкий долготный диапазон.

В диссертации впервые для определения фазовой скорости и формы волнового фронта крупномасштабных возмущений использованы пять наборов GPS-станций, максимально распределенных по широте в различных долготных секторах Северного полушария, включая камчатский сектор.

На рис. 6 для момента времени 07:00 UT (спустя ~50 минут после внезапного начала магнитной бури 29 октября 2003 г. в 06:11 UT) жирными кривыми черного и серого цвета показаны соответственно приблизительные положения минимумов и максимумов вариаций ПЭС. Для примера тонкой черной кривой показано меридиональное распределение амплитуды КМ вариаций ПЭС в секторе С (Камчатская региональная сеть станций GPS), черными точками – положения максимума и минимумов вариаций. Волновые векторы возмущений для различных меридиональных секторов А–Е, показанные стрелками, ориентированы в экваториальном направлении. Кажущийся центр кольцевого возмущения находится в авроральной области. Динамика КМ-возмущения вдоль направления распространения в секторе С представлена на верхней панели рис. 6.

При анализе данных для всех наборов GPS-станций впервые зарегистрировано КМ ПИВ в форме уединенной волны с фазовым фронтом «кольцевого» типа, образовавшееся в авроральной зоне после внезапного начала магнитной бури 29.10.2003 г. Возмущение длительностью около 40 мин и с длиной волны до 3000 км распространялось в экваториальном направлении со скоростью до 1500 м/с в утреннем, дневном и вечернем секторах Северного полушария и 700–1000 м/с в ночном секторе.

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

1. Впервые разработан метод и программы для вычисления по данным GPS и ионосферной модели IRI-2001 нового ионосферного параметра – глобального электронного содержания. Установлено, что в течение 23-го цикла солнечной активности ГЭС менялось в пределах 0.5–3.2 GECU в соответствии с динамикой УФ-излучения Солнца и индекса F10.7. Для ГЭС характерны сильные (до 30%) сезонные вариации с максимумом в периоды равноденствия, а также сезонные вариации отношения ГЭС на дневной и ночной сторонах Земли с максимумом во время летнего и зимнего солнцестояния. 27-дневные вариации ГЭС подобны соответствующим изменениям F10.7 и УФ (коэффициент корреляции больше 0.9), но запаздывают в среднем на два дня. Относительная амплитуда 27-дневных вариаций уменьшается с 8% в периоды роста и спада солнечной активности до 2% в период максимума, что соответствует динамике активных образований на Солнце в течение 11-летнего цикла активности.

2. Установлено, что в целом экспериментальные и модельные значения ГЭС демонстрируют хорошее соответствие, однако обнаружены и заметные расхождения. Относительная разность между рядами рассчитанного по модели IRI-2001 и экспериментального ГЭС увеличиваются от 1.5% до 9.0 % по мере уменьшения временного окна сглаживания от одного года до 10 дней. Фаза сезонных вариаций в модели различается (с отставанием или опережением) на 20–40 дней относительно экспериментальных значений. В период максимума расчетное отношение ГЭС для дневной и ночной сторон Земли меняется в более узком интервале (от 2.7 до 3.1), чем в эксперименте (от 2.8 до 3.5).
3. Установлено, что среднее значение относительной амплитуды ПИВ увеличивается до 8% пропорционально значению планетарного индекса K_p ; коэффициент пропорциональности на высоких широтах $k=0.37$, на средних $k=0.2$, на экваторе $k<0.1$. При низком уровне геомагнитной активности относительная амплитуда возмущений ночью существенно превышает дневные значения: на экваторе и на высоких широтах в 3–5 раз, на средних широтах в 2 раза. Во время магнитных бурь геомагнитный контроль амплитуды вариаций ПЭС на высоких и средних широтах оказывается более существенным, чем регулярные суточные изменения. На экваторе амплитуда возмущений практически не зависит от уровня геомагнитной активности.
4. Впервые для определения фазовой скорости и формы волнового фронта крупномасштабных возмущений в различных долготных секторах Северного полушария использованы пять наборов GPS-станций, максимально распределенных по широте, включая Камчатскую региональную сеть. Получено экспериментальное доказательство существования крупномасштабных возмущений с кольцевой формой волнового фронта. Кажущийся центр кольцевого возмущения находится в авроральной области. Такие возмущения появляются во время максимальных изменений магнитного поля Земли, имеют характерную длительность порядка 40 мин, относительную амплитуду до 40% и перемещаются в направлении, близком экваториальному со скоростью до 1500 м/с в утреннем, дневном и вечернем секторах Северного полушария и 700–1000 м/с в ночном секторе.

Основные публикации автора по теме диссертации:

1. Афраймович Э.Л., Живетьев И.В., Бузевич А.В. Крупномасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения во время магнитной бури 29–30 октября 2003 г. по данным камчатской сети станций GPS // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45. № 1. С. 123–126.

2. Афраймович Э.Л., Живетьев И.В. Ионосферный отклик главного толчка Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г. по данным Камчатской региональной сети станций GPS // Вулканология и сейсмология. 2005. № 4. С. 56–62.
3. Афраймович Э.Л., Живетьев И.В. Динамика крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений аврорального происхождения. Реакция на внезапное начало магнитной бури 29 октября 2003 // Труды XXI Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». 2005. Т. 1. С. 129–133.
4. Афраймович Э.Л., Живетьев И.В., Косогоров Е.А. Относительная амплитуда вариаций полного электронного содержания по данным глобальной сети GPS // Труды VIII конференции молодых ученых «Астрофизика и физика околоземного космического пространства». Иркутск. 2005. С. 116–117.
5. Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В. Солнечная активность и глобальное электронное содержание // Доклады Академии наук. 2006. Т. 409. № 3. С. 399–402.
6. Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В. Глобальное электронное содержание. Метод определения и динамика в течение 23-го цикла солнечной активности // Труды IX конференции молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде». БШФФ-2006. Изд-во ИСЗФ СО РАН. Иркутск. 2006. С. 109–111.
7. Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Oinats A.V., Yasukevich Y.V., Zhivetiev I.V. Global electron content and solar activity: comparison with IRI modeling results // Proceedings of IGS-2006, Darmstadt, 8–11 May http://nng.esoc.esa.de/ws2006/Papers/p_Afraimovich_GEC_IRI_IGS_update.pdf.gz.
8. Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V., Yasukevich Yu.V., Zhivetiev I.V. Global electron content as a new index of solar activity. Comparison with IRI modeling results // IRI News. 2006. V. 13. N 1. October 2006. A5.
9. Voeykov S.V., Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Perevalova N.P., Zhivetiev I.V. Relative amplitude of medium-scale traveling ionospheric disturbances as deduced from global GPS network // <http://www.cosis.net/abstracts/COSPAR2006/00122/COSPAR2006-A-00122.pdf>

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. 1988. М.: Наука. 499 с.

2. Вернадский В.И. Научная мысль как планетное явление. 1977. М.: Наука. 191 с.
3. Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре-ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космические исследования. 2004. Т. 42. № 5. С. 453–508.
4. Гусев А.А., Левина В.И., Салтыков В.А., Гордеев Е.И. Сильное Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года: основные данные, сейсмичность очаговой зоны, механизм очага. Макросейсмический эффект // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года: предвестники, особенности, последствия. 1998. Петропавловск-Камчатский. С. 32–54.
5. Захаренкова И.Е. Использование измерений сигналов системы GPS для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Калининград. 2007. 20 с.
6. Мордвинов А.В., Плюснина Л.А. Когерентные структуры в динамике крупномасштабного магнитного поля Солнца // Астрономический журнал. 2001. Т. 78. № 8. С. 753–760.
7. Морозова Л.И. Тайфуны и сейсмичность // Доклады Академии Наук. 2006. Т. 410. № 3. С. 397–400.
8. Соболев Г.А., Шестопалов И.П., Харин Е.П. Геоэффективные солнечные вспышки и сейсмическая активность Земли // Физика Земли. 1998. № 7. С. 85–90.
9. Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1989. № 2. С. 13–30.
10. Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Permyakova V.E., Steblov G.M., Shalimov S.L. Variations of the total electron content in the ionosphere from GPS data recorded during the Hector Mine earthquake of October 16, 1999, California // Russian Journal of Earth Sciences. 2004. V. 6. N 5. P. 339–354.
11. Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Lesyuta O.S., Yakovets A.F., Ushakov I.I. Geomagnetic control of the spectrum of traveling ionospheric disturbances based on data from a global GPS network // Ann. Geophys. 2001. V. 19. N 7. P. 723–731.
12. Liu J.Y., Chuo Y.J., Shan S.J., Tsai Y.B., Chen Y.I., Pulinets S.A., Yu S.B. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 1585–1593.

13. Liu L., Wan W., Ning B., Pirog O.M., Kurkin V.I. Solar activity variations of the ionospheric peak electron density // *J. Geophys. Res.* V. 111. doi: 10.1029/2006JA011598.
14. Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.H., Lindgwister U.J., Runge T.F. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // *Radio Sci.* 1998. V. 33. N 3. P. 565–582.
15. Mordvinov A.V., Willson R.C. Effect of large-scale magnetic fields on total solar irradiance // *Solar Phys.* 2003. V. 215. P. 5–16.
16. Nusinov A.A., Katyushina V.V. Lyman-alpha line intensity as a solar activity index in the far ultraviolet range // *Solar Phys.* 1994. V. 152. P. 201–206.