

## МАГНИТНЫЕ БУРИ В ОКТЯБРЕ 2003 ГОДА

Коллаборация «Солнечные экстремальные события 2003 года (СЭС - 2003)»

Панасюк М.И. 1, Кузнецов С.Н.1, Лазутин Л.Л.1, Авдюшин С.И. 2, Алексеев И.И.1, Аммосов П.П. 3, Антонова А.Е. 1, Баишев Д.Г. 3, Беленькая Е.С. 1, Белецкий А.Б. 4, Белов А.В. 5, Бенгин В.В. 6, Бобровников С.Ю. 1, Бондаренко В.А. 6, Боярчук К.А. 5, Веселовский И.С. 1, Вьюшкова Т.Ю. 7, Гаврильева Г.А. 3, Гайдаш С.П. 5, Гинзбург Е.А. 2, Денисов Ю.И. 1, Дмитриев А.В. 1, Жеребцов Г.А. 4, Зеленый Л.М. 8, Иванов-Холодный Г.С. 5, Калегает В.В. 1, Канониди Х.Д. 5, Клейменова Н.Г.9, Козырева О.В. 9, Коломийцев О.П. 5, Крашенинников И.А.5, Криволицкий А.А. 11/7, Кропоткин А.П. 1, Куминов А.А. 11/7, Лещенко Л.Н. 2\5, Марьин Б.В. 1, Митрикас В.Г. 6, Михалев А.В. 4, Муллаяров В.А. 3, Муравьева Е.А. 1, Мягкова И.Н. 1, Петров В.М. 6, Петрукович А.А. 8, Подорольский А.Н. 1, Пудовкин М.И. 10, Самсонов С.Н. 3, Сахаров Я.А. 11, Свидский П.М. 2, Соколов В.Д. 3, Соловьев С.И. 3, Сосновец Э.Н. 1, Старков Г.В. 11, Старостин Л.И. 1, Тверская Л.В. 1, Тельцов М.В. 1, Трошичев О.А. 12, Цетлин В.В. 6, Юшков Б.Ю. 1

1. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ
2. Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова, г. Москва
3. Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск
4. Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск
5. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, г. Троицк
6. Институт медико-биологических проблем, г. Москва
7. Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный
8. Институт космических исследований РАН, г. Москва
9. Объединённый Институт физики Земли РАН, г. Москва
10. Научно-исследовательский физический институт, Санкт-Петербургского государственного университета
11. Полярный геофизический институт Кольского филиала РАН, г. Апатиты
12. Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### **1. Введение.**

### **2. Общая характеристика магнитосферной активности.**

### **3. Динамика магнитосферы**

- 3.1. Суббуревая активность.
  - 3.1.1. Динамика авроральной зоны.
  - 3.1.2. Суббури в сияниях на средних широтах.
  - 3.1.3. Ионосферные эффекты над Москвой.
  - 3.1.4. Высыпания авроральных электронов. ИСЗ Метеор-3М
- 3.2. Длиннопериодные магнитные пульсации
  - 3.2.1. Дневные пульсации диапазона Pc5.
  - 3.2.2. Ночные геомагнитные пульсации диапазона Pi2-3 во время суббури.
- 3.3. ОНЧ-излучение в Якутске.
- 3.4. Динамика магнитного поля. Модельные расчёты.

### **4. Динамика энергичных частиц в магнитосфере.**

- 4.1. Солнечные космические лучи (СКЛ) в магнитосфере Земли

- 4.1.1. Потоки СКЛ в полярной шапке
- 4.1.2. Потоки солнечных протонов на геостационарной орбите
- 4.1.3. Граница проникновения солнечных электронов
- 4.1.4. Граница проникновения солнечных протонов
- 4.1.5. Движения границы проникновения до начала бури
- 4.2 Динамика радиационных поясов.
  - 4.2.1. Динамика внешнего пояса электронов, ИСЗ Метеор-3М
  - 4.2.2. Динамика радиационных поясов. ИСЗ Коронас-Ф
  - 4.2.3. Рост потока электронов после бури. ИСЗ Экспресс А-2 и А-3.
- 4.3. Радиационная обстановка на Международной космической станции

## **5. Эффекты в озоносфере земли.**

## **6. Обсуждение и выводы.**

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Активные процессы на Солнце в конце октября 2003 года инициировали серию магнитосферных возмущений, изучение которых представляет значительный интерес для понимания физики магнитосферы и задач практического значения. Отечественные экспериментальные ресурсы представляют на данный момент большой комплекс наземных и космических приборов, достаточных для серьезного исследования процессов солнечно-земной активности. Настоящая работа является попыткой объединить усилия российских научных коллективов для изучения экстремальных событий в октябре-ноябре 2003 года. Поэтому основной упор в ней будет сделан на осмыслении результатов измерений на отечественных космических аппаратах и наземных обсерваториях.

Магнитная буря вызывает в магнитосфере множество процессов. Мы рассмотрим основные - деформации структуры магнитосферы, границы проникновения солнечных космических лучей, границы авроральной зоны и полярной шапки, динамики радиационных поясов, влияние суббури на развитие токовых систем магнитной бури. Теоретическая часть представлена модельными расчетами для данной конкретной серии мировых бурь на базе параболоидной модели магнитосферы и сравнением результатов модели с измерениями. Цельная картина бури смоделирована как изменение во времени глобальных магнитосферных токовых систем. Эти токовые системы присутствуют перманентно, они существуют и в спокойной магнитосфере. Однако во время бури, под воздействием мощных потоков солнечной

плазмы, интенсивность этих токовых систем возрастает более чем на порядок. Кардинально меняется и пространственная структура магнитосферы.

Настоящая работа представляет собой первую попытку создания коллаборации большой группы авторов и научных коллективов для оперативного анализа событий, представляющих исключительный интерес для фундаментальных и прикладных задач космической погоды. При этом неизбежно возникает неоднородность отдельных разделов в размерах и стиле изложения. Неизбежны и расхождения в интерпретации результатов наблюдений, и читателю не навязывается лишь одна из версий. Многие выводы носят предварительный характер, большая часть работ представлена в сжатом виде и несомненно будет развернута в последующих публикациях.

### 2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАГНИТОСФЕРНОЙ АКТИВНОСТИ

Исследованию процессов на Солнце и в гелиосфере посвящена первая статья коллаборации [1]. Здесь мы дадим краткую сводку параметров солнечного ветра, определявших динамику магнитосферных процессов в исследуемый период.

По геомагнитной активности 2003 год стал бы самым возмущенным годом 23-го цикла даже без последнего всплеска солнечной активности. Все наиболее сильные межпланетные и геомагнитные возмущения в 2003 году были связаны с эруптивной активностью Солнца. На протяжении всего года

Земля переходила из одного высокоскоростного потока солнечного ветра, обусловленного корональной дырой, в другой поток. Причем магнитные бури, вызванные высокоскоростным потоком солнечного ветра из одной, самой протяженной корональной дыры, продолжались по несколько суток подряд, а порой и дольше недели. Когда же к влиянию корональных дыр добавились спорадические эффекты, средняя активность магнитного поля Земли стала исключительно высокой. Это хорошо видно на графике поведения

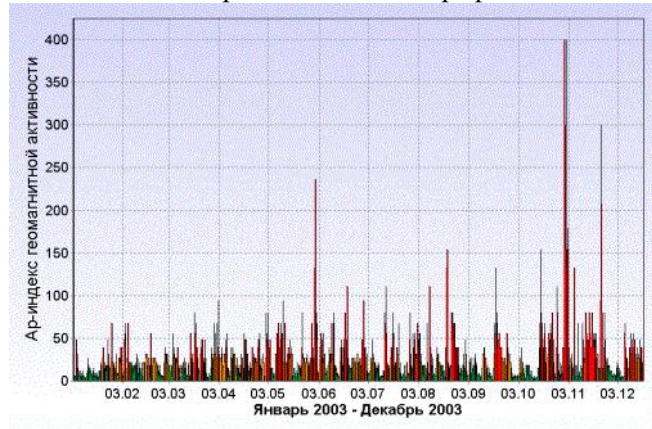


Рис. 1. Суточные значения Ар-индекса геомагнитной активности в 2003 году

Ар-индекса геомагнитной активности в 2003 году (рис. 1). Второй максимум геомагнитной активности, как правило, наблюдается на спаде солнечного цикла, но в текущем цикле он оказался значительно выше первого. Средний за год Ар-индекс геомагнитной активности в 2003 году равен 21,9 нТл. Это очень высокое значение, уступающее только 1951, 1960, 1982 и 1991 годам (рис. 2).

#### Среднегодовые значения Ар

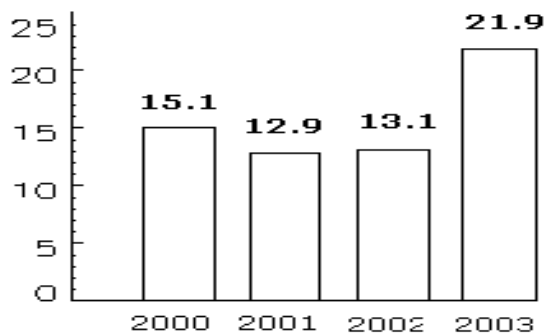


Рис. 2. Среднегодовые значения Ар-индекса геомагнитной активности в период с 2000 по 2003 г

В 2003 году по предварительным расчетам зарегистрированы 62 магнитные бури. Среди них: исключительно возмущенные периоды 29 - 31

октября и 20 ноября. Трижды 29 - 30 октября наблюдался максимально возможный трехчасовой Кр-индекс, равный 9; в текущем цикле до этого был только один такой 3-часовой интервал в июле 2000 года. Три последних дня октября оказались самым возмущенным трехдневным интервалом за всю историю Ар-индексов.

Высокая магнитная активность явилась следствием исключительно высокой активности на Солнце. Первая группа пятен появилась на восточном лимбе 17 октября, и к 29-му октября создалась редчайшая ситуация, когда три огромные группы пятен одновременно находились на видимом диске Солнца. Последовала серия вспышек, всплесков радиоизлучения, выбросов вещества. Из этой серии следует выделить вспышку X17.2/4B вблизи центрального меридиана, начавшуюся 28 октября в 9.51 UT и достигшую максимума в 11.10 UT. Она сопровождалась мощными радиовсплесками всех типов и ускорением заряженных частиц до энергии свыше 7 ГэВ. Во время вспышки наблюдался очень большой, плотный и быстрый выброс солнечного вещества, со скоростью свыше 2100 км/с. Межпланетная ударная волна (МУВ) достигла Земли 29 октября в 6.12 UT, всего через 19 часов после вспышки. Это самый быстрый приход межпланетного возмущения с 1972 года.

Вечером 29-го произошла еще одна гигантская протонная вспышка (X10.0/2B S15W02) с радиовсплесками 2-го и 4-го типа, большим потоком ускоренных частиц и ярким и быстрым (скорость почти 2000 км/с) выбросом вещества.

В результате уникального сочетания воздействия двух скоростных потоков солнечного ветра началась исключительно большая серия магнитных бурь.

К сожалению, при экстремальных параметрах корональных выбросов массы (КВМ), имевших место во время магнитных бурь октября 2003 года, детекторы КА, предназначенные для регистрации характеристик плазмы в околоземном пространстве, оказались не готовы к работе в таких условиях. Мощные потоки частиц привели к нарушениям в работе приборов, измерявших параметры плазмы, практически на всех космических аппаратах, осуществлявших мониторинг солнечного ветра (ACE, Geotail, SOHO). В результате, данные по скорости и плотности солнечного ветра во время главной фазы магнитных бурь 28 - 31 октября 2003 года носят фрагментарный и противоречивый

характер. Тем не менее, представленные через Интернет в распоряжение научной общественности данные этих космических аппаратов позволяют восстановить временной профиль потока солнечного ветра в окрестности магнитосферы и являются наряду с магнитными индексами ценной опорой для конкретного анализа магнитосферных процессов.

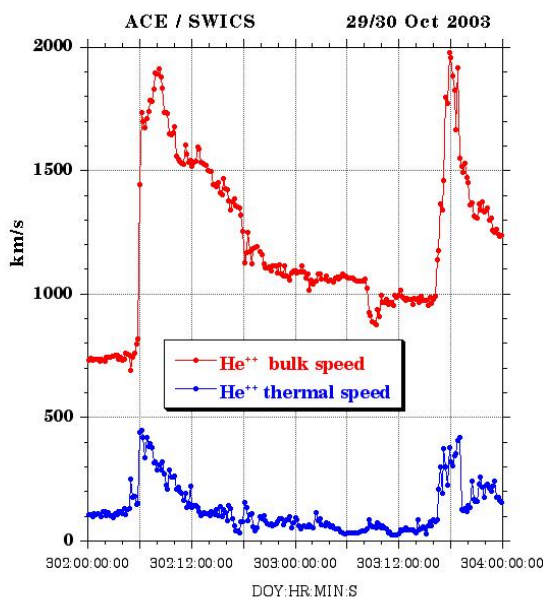


Рис. 3. Скорость плазмы солнечного ветра, полученная по спектру He<sup>++</sup>. Данные прибора SWICS на КА ACE, находящемся в точке либрации. 1 - потоковая скорость, 2 - тепловая скорость.

На рис. 3 показана потоковая скорость плазмы солнечного ветра, полученная по спектру He<sup>++</sup>, измеренному прибором SWICS на КА ACE,

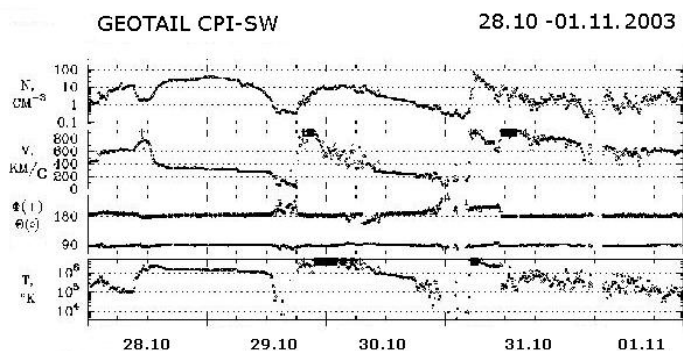


Рис. 4. Результаты измерений плазменного анализатора на КА Geotail с 28.X по 1.XI.2003г. Сверху вниз - плотность, скорость, углы наклона и температура плазмы

предназначенном для изучения энергетического спектра ионов солнечного ветра. Скорость плазмы солнечного ветра была определена по данным

SWICS/ACE, поскольку дрейфовая скорость ионов в скрещенных полях не зависит от массы и заряда иона. Для определения плотности потока солнечного ветра использовали данные КА Geotail (рис.4), который 28 - 29 октября находился в солнечном ветре, вверх по потоку от головной ударной волны.

Экстремально мощные проявления солнечной активности привели к исключительно сильной ответной реакции магнитосферы, ионосферы и атмосферы Земли и нашли свое отражение во впечатляющих изменениях состояния плазмы, популяций высокоэнергичных заряженных частиц, электрических токов и электромагнитных полей.

Значительно возросшее давление солнечного ветра и сильное межпланетное магнитное поле (ММП) геоэффективного южного направления резко изменили структуру магнитосферы Земли, раздвинув границы проникновения солнечных энергичных частиц вглубь магнитосферы и уменьшив размеры области, в которой может существовать захваченная радиация (радиационные пояса). Согласно усредненным за одну минуту данным магнитометров геостационарных спутников GOES-10 и GOES-12, Bz компонента магнитосферного магнитного поля на

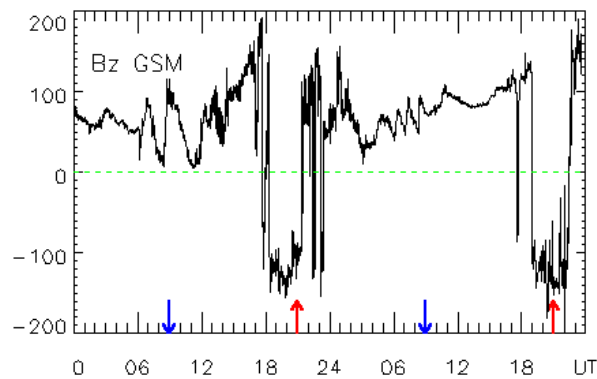


Рис. 5. Bz компонента геомагнитного поля, измеренная на геостационарном спутнике GOES-10 28-31.X.2003 г. Стрелки, направленные вниз и вверх обозначают местные полдень и полночь, соответственно

геосинхронной орбите 29 и 30.X.2003 г. испытывала сильные вариации, свидетельствующие о выходе спутника в переходную область на дневной стороне и в хвост магнитосферы на ночной (см. рис. 5).

Магнитная обстановка была исключительно возмущенной весь рассматриваемый период.

Наблюдалась серия мощных суббурь, которые происходили ежедневно, а относительно спокойные паузы продолжались не более нескольких часов. Три магнитных бури - с внезапным началом в 06.12 UT 29.X.2003 г., с постепенным началом в 12 UT того же дня и постепенным началом в 16 - 18 UT 30.X.2003 г., составили центральную совокупность событий, которая может быть представлена как развитие сильной магнитной бури в три этапа.

По данным Мирового центра данных C2 в Киото величина AE индекса достигала 4000 нТл, что примерно в два раза выше обычно регистрируемой (~1500 - 2000 нТл) во время магнитных бурь.

Детальный анализ причин такой высокой интенсивности и динамики авроральных электроджетов может быть проведен позднее, после получения уточненных результатов наблюдений различных параметров магнитосферы, однако, некоторые выводы можно сделать, используя уже имеющиеся предварительные данные.

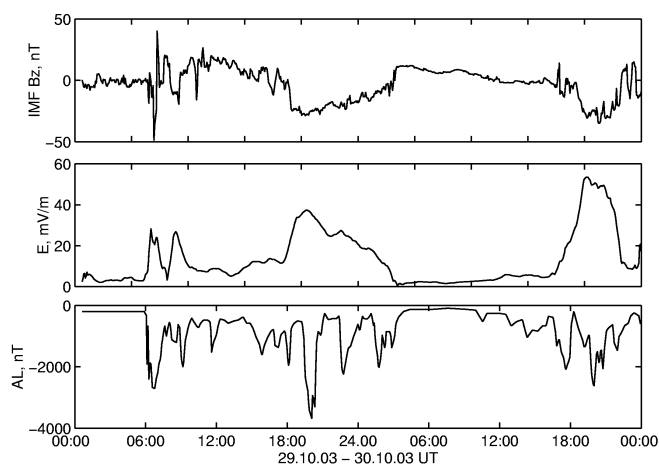


Рис. 6. Bz компонента межпланетного магнитного поля в системе координат GSM; электрическое поле солнечного ветра, вычисленное по данным спутника ACE смещенным по времени с учетом удаления спутника от Земли и предварительный AL индекс для 29-30 октября 2003 г.

На рис. 6 приведены графики Bz компоненты межпланетного магнитного поля в системе координат GSM; электрического поля солнечного ветра, вычисленного по формуле

$$V \sqrt{B_z^2 + B_y^2} / 2 + \dot{a} V^2, \dot{a} = 4.4 \times 10^{-6} \text{ (мВ/м)/(км/с)}^2$$

(эта комбинация параметров солнечного ветра наиболее хорошо коррелирует с индексом AL, см. [2]); а также AL индекса (оцифрованного по предварительному графику). При вычислении

электрического поля были использованы значения скорости солнечного ветра, приведенные на рис. 3.

Именно аномально высокая скорость солнечного ветра, дающая основной вклад в величину электрического поля, достигающую 40-50 мВ/м, и является, вероятно, главной причиной столь высокой геомагнитной активности. Тем не менее, необходимо отметить, что вариации AL подобной амплитуды не уникальны и регистрировались и во время менее сильных магнитных бурь. Например, 25 сентября 1998 г. при умеренном значении электрического поля солнечного ветра около 12 мВ/м станции сети магнитометров CANOPUS зарегистрировали отклонение горизонтальной компоненты до величин порядка -4000 нТл, что объяснялось, в частности, особенностями суббуревой активности.

### 3. ДИНАМИКА МАГНИТОСФЕРЫ

Значительные изменения структуры магнитосферы является главным процессом магнитной бури, а раскрытие физической природы этих изменений - ведущей задачей исследования мировых бурь. Динамика магнитосферы определяется как первичным внешним воздействием пришедшей от Солнца ударной волны, так и воздействием "изнутри", связанным, например, с усилением крупномасштабного электрического поля системы солнечный ветер - магнитосфера. В свою очередь внутреннее воздействие на структуру магнитосферы можно разделить на прямое (driven) и задержанное, с накоплением энергии и высвобождением ее посредством суббурь.

Непосредственным результатом этих воздействий является ускорение, высыпание, и другие изменения потоков заряженных частиц и связанных с ними токовых систем в магнитосфере, а также значительные подвижки границ и структур, в том числе и расположенных во внутренней магнитосфере и весьма устойчивых в отсутствие магнитных бурь. Это и упоминавшееся выше приближение к Земле границы магнитосферы на дневной стороне, и движение к Земле границ устойчивого захвата и радиационных поясов, границ квазизахвата и, соответственно, зоны активных форм полярных сияний.

Процессы внутреннего воздействия на динамику магнитосферы отражаются в наземных наблюдениях вариаций и пульсаций магнитного поля, полярных

сияниях, в ионосферных возмущениях. Они будут рассмотрены в настоящем разделе. Кроме того, динамика магнитосферы прослеживается по измерениям распределения частиц высоких энергий, которые сами не меняют структуру магнитосферы, но отслеживают ее изменения. Эти измерения будут представлены в четвертой главе.

### 3.1. СУББУРЕВАЯ АКТИВНОСТЬ

#### 3.1.1. Динамика авроральной зоны

Магнитосферные суббури сопровождают мировые бури и являются их важной составляющей. Связь индексов суббуревой активности и Dst известна давно и подтверждалась во многих работах. Так, Пудовкин, Зайцева и Сизова

[3] показали существование хорошей корреляции без видимой задержки между Dst и Dp. Аналогичные результаты были получены рядом других исследователей [4, 5]. Эта связь указывала на важную, если не основную, роль асимметричного протонного кольцевого тока, возникающего благодаря инъекции протонов 20 -100 кэВ во время суббурь на ночной стороне Земли. Вместе с тем Йемори [6] предположил, что начало суббури связано не с усилением, а с началом затухания Dst-вариации, результат прямо противоположный принятому до этого мнению.

В развитие этих идей в работе Мальцева [7] утверждается, что суббури не играют никакой роли в развитии магнитных бурь. Поэтому рассмотрение роли суббурь в конкретной цепочке мировых бурь октября - ноября 2003 г. имеет важное значение.

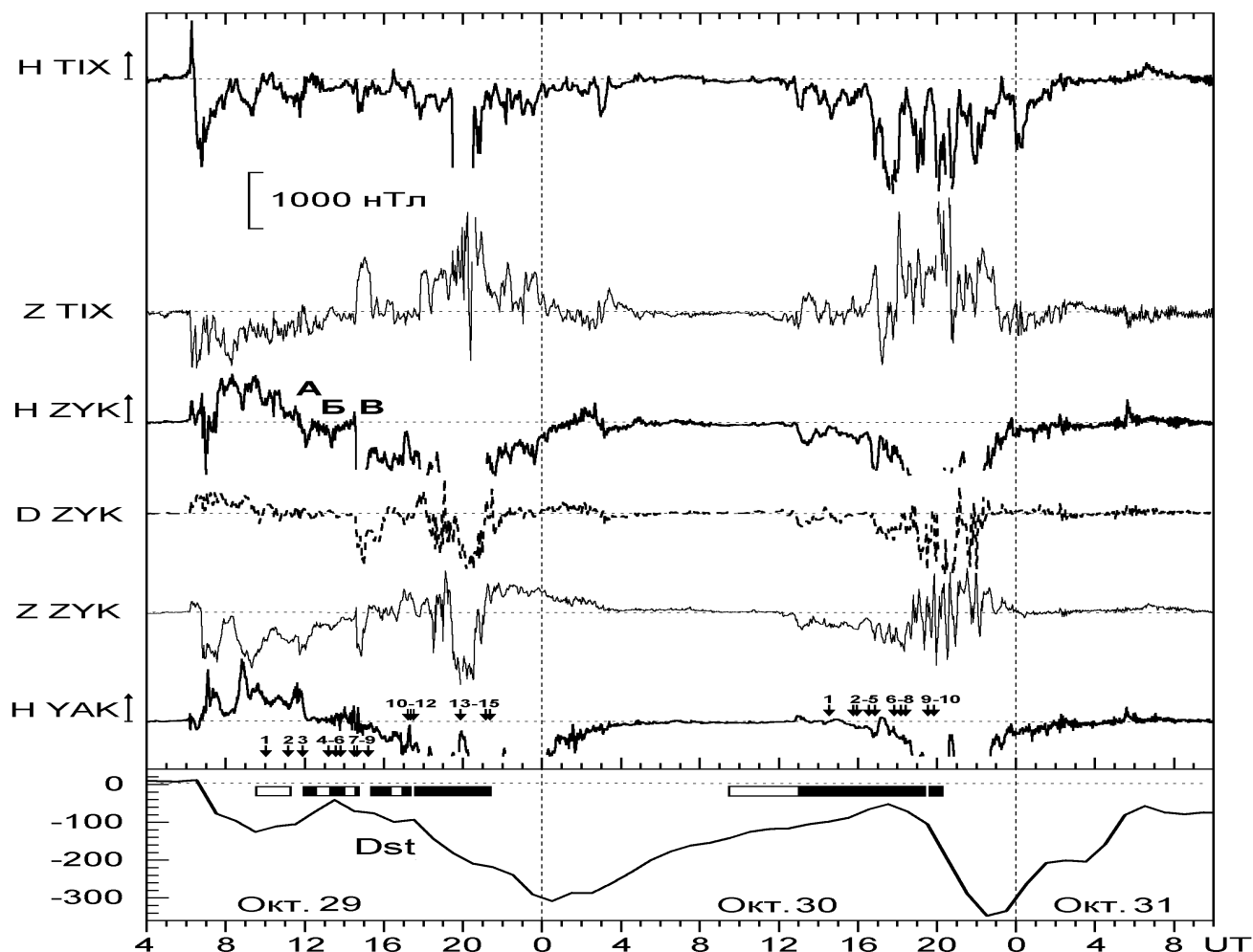


Рис. 7. Магнитограммы восточной цепочки станций (ИКФИА) 29 - 31.X.2003 г. Сверху вниз: Тикси (TIX), Зырянка (ZYK), Якутск (YAK) и вариации Dst индекса. Прямоугольниками отмечены интервалы работы ТВ камеры всего неба на ст. Жиганск, где зачернениям соответствуют усиления авроральной активности. Цифры со стрелками 1 - 15 и 1 - 10 указывают моменты съёмки кадров полярных сияний 29 - 30.X.2003 г., приведенных на рис. 7.7/13.

Общее представление о суббуревой активности дают магнитограммы восточной цепочки станций - Тикси (ТИХ), Зырянка (ЗУК) и Якутск (УАК) (рис. 7) и магнитометров западной цепочки - Ловозеро (рис. 8) и Москвы (рис. 9).

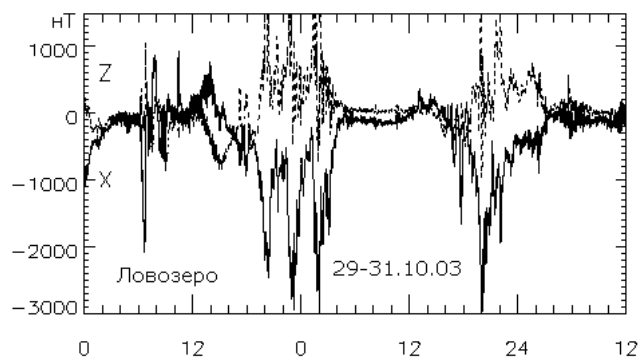


Рис. 8. Магнитограмма ст. Ловозеро (ПГИ) 29 - 31.X.2003 г.

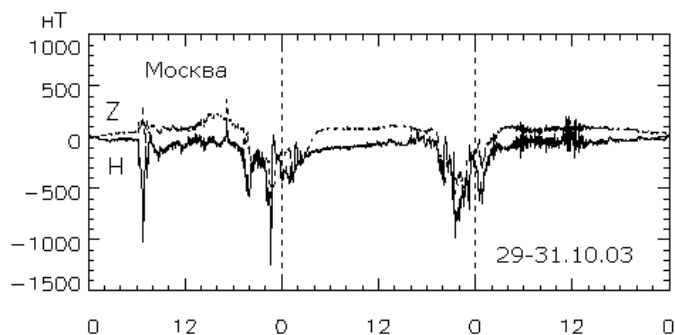


Рис. 9. Магнитограмма ст. Москва (ИЗМИРАН) 29 - 31.X.2003 г.

**Связь с Dst.** В нижней части рис. 7 мы в очередной раз в качестве опорного приводим график Dst-вариации, чтобы подчеркнуть четкое совпадение главных фаз магнитной бури вечером 29 и 30 октября с цепочками бухтообразных возмущений. Обращаясь к рис.8, мы также видим и здесь свидетельство совпадения суббуревой активности с нарастанием токовой системы магнитных бурь. Утверждения о том, что активные фазы суббурь связаны с уменьшением Dst, нашими наблюдениями не подтверждаются.

Традиционная точка зрения о том, что ионы, ускоренные в процессе суббури, дают основной вклад в частичный кольцевой ток на главной фазе магнитной бури - остается предпочтительной.

**Смещение по широте.** По соотношению горизонтальной и вертикальной компонент вариации магнитного поля можно определить, что в большинстве бухтообразных возмущений центр

токовой системы находился южнее станций авроральной зоны, т.е. южная граница зоны полярных сияний сдвинута к экватору. Что касается приполюсной границы, т.е. границы полярной шапки, то она сдвигается не так сильно, как экваториальная граница, активность не уходит из традиционной зоны полярных сияний, а если уходит, то ненадолго. И 29, и 30 октября мы видим по знаку вертикальной компоненты магнитного поля, что суббуря зарождается на юге, но иногда в процессе экспансии суббури активность проскакивает к полюсу от Ловозеро и Тикси. Также и риометрические всплески поглощения аврорального типа, один - 29.X и несколько - 30.X.2003 г. свидетельствуют о том, что ускорение авроральных частиц происходило на широте Тикси (рис. 10).

Только вблизи максимумов Dst и лишь на короткое время авроральные станции оказываются в полярной шапке, в частности, в интервале 22 - 24 UT 30 октября.

Небольшая амплитуда магнитной бухты в 22UT в Ловозеро и Тикси и слабый уровень риометрического поглощения не означает реального уменьшения мощности суббури, но есть следствие выхода авроральных станций в область полярной шапки. На рис. 9 приведена магнитограмма ст. Москва (ИЗМИРАН), на которой виден рост амплитуды возмущения в это время. Этот сдвиг суббури в 22 UT к югу от авроральной зоны совпадает с измеренным на ИСЗ Коронас-Ф максимальным сдвигом к Земле границы проникновения солнечных космических лучей (СКЛ) и границы полярной шапки (см. раздел 4.1).

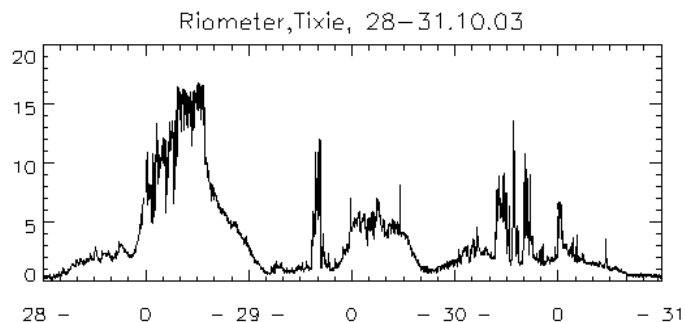


Рис.10. Поглощение космического радиошума, измеренное риометром обс. Тикси в период с 28 по 31.X.2003 г

31 октября в 00.15 UT вновь наблюдается классическая суббуря авроральной зоны. Аномально близкий к Земле сдвиг границ продолжался недолго, меньше 2 часов. При этом зона полярных сияний

остается широкой, т.е. между зоной стабильного захвата и хвостом магнитосферы всегда остается широкая область квазизахвата.

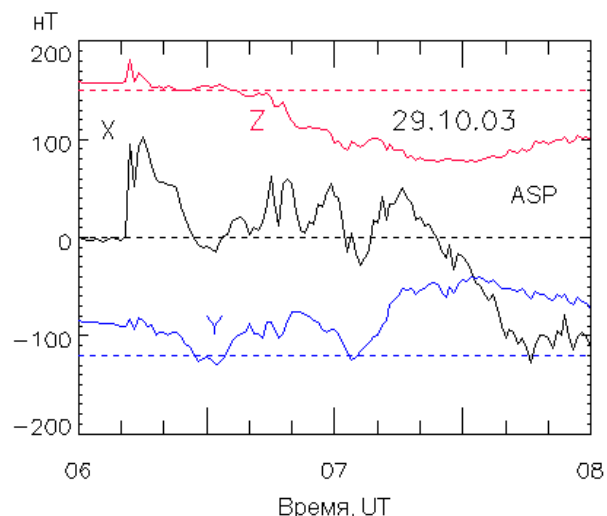


Рис. 11. Импульс SC и начало главной фазы бури 29.X.2003 г. на приэкваториальной станции Alice Spring.

**SC 29 октября.** Внезапное начало типа SC+ иллюстрируется магнитограммой австралийской станции Alice Spring (рис. 11). Известно, что SC может запускать суббурю в авроральной зоне, в частности, если наблюдается подготовительная

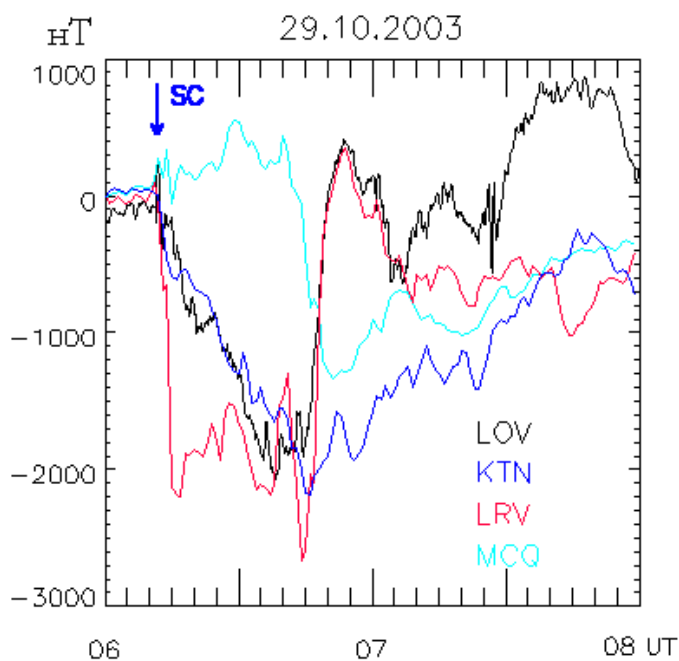


Рис. 12. Вариации H-составляющих магнитометров обсерваторий Ловозеро, Котельный, Лейрвогюр и Макуэри 29.X.2003г. во время суббури, триггерированной SC.

фаза и в магнитосфере накоплена энергия. В нашем случае в полуночном секторе развивается мощная суббуря, и сильное возмущение наблюдается как в авроральной зоне, так и в средних широтах (рис. 12). Разделить суббуревой эффект и возмущение главной фазы бури здесь трудно, необходимы дополнительные исследования.

### 3.1.2. Суббури и полярные сияния на средних широтах

На рис. 13 приведена серия снимков полярных сияний, зарегистрированных в обсерватории Жиганск (ИКФИА) в период с 10.02 UT до 21.14 UT 29.X.2003г. и с 14.35 до 19.48 UT 30.X.2003г. Моменты съемки указаны стрелками на рис. 7. Обсерватория расположена вблизи южной границы авроральной зоны и в ее поле зрения оказываются возмущения и в традиционной авроральной области (например, в 17.55 UT 30.X), и в субавроральной зоне.

Как видно из рис.13 в 14.33 UT 29 октября наблюдался брейкап сияния классического типа на южном горизонте с последующей типичной для суббурь экспансией к полюсу. Резкое начало бухты в H-составляющей наблюдалось в Зырянке (ЗЫК), расположенной на широте, близкой широте Жиганска ( $60^\circ$  исправленной геомагнитной широты), но восточнее его на  $\sim 1000$  км, с амплитудой около 1000 нТл и на магнитометре ст. Чокурдах - 600 нТл. Эта суббуря совпала с началом главной фазы второй магнитной бури, при этом граница полярной шапки была около  $60^\circ$ , граница проникновения солнечных протонов на  $53^\circ$  исправленной геомагнитной широты. Одновременно вспышка сияний была зарегистрирована на ст. Маймага (ИКФИА).

**Оптический полигон ИКФИА, ст. Маймага** ( $\lambda = 63^\circ$  N,  $\varphi = 129,5^\circ$  E), расположен на 150 км севернее Якутска. Наблюдения велись на инфракрасном цифровом спектрометре, предназначенном для измерения вращательной температуры молекул гидроксидов и кислорода, на высотах 87 и 94 км, соответственно. Подробное описание прибора можно найти в [8]. В регистрируемую область спектра спектрографа попадает разрешенная линия атомарного кислорода OI 844,6 нм, характерная для полярных сияний. Спектрограф работает в темное время суток постоянно - с августа по 15 мая; временное разрешение 10 мин. 29 октября максимальная интенсивность этой эмиссии



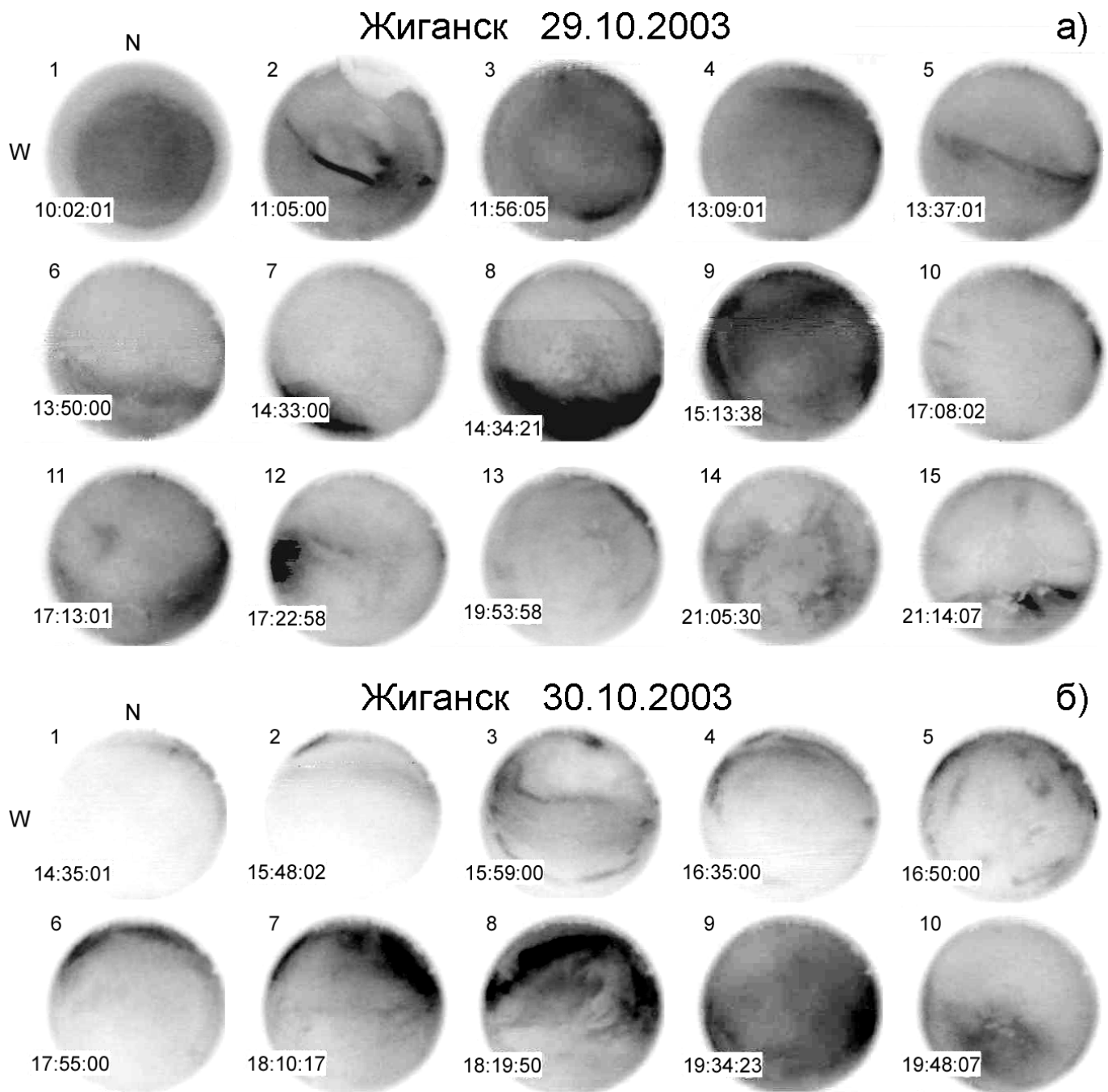


Рис. 13. Кадры съемки полярных сияний на станции Жиганск (ИКФИА) 29-30.X.2003 г.

доходила до 12 кРл (абсолютная калибровка производится записью сенситометрической установки с известной цветовой температурой). Повышенная интенсивность ОI 844,6 нм регистрировалась три ночи: 29, 30 и 31 октября; в другие ночи до 29.X и после 31-го сияния не наблюдалось. Параллельно на станции Маймага работала камера

всего неба, предназначенная для регистрации внутренних гравитационных волн по вариациям эмиссий молекулы гидроксила. Из-за большой выдержки (150 сек) почти все кадры в ночь 29 октября получились передержанные. На рис. 14 представлены вариации интенсивности свечения в линии 844.6 нм 29, 30 и 31.X.2003г., соответственно. К сожалению, в момент SC на станции было еще светло, и измерения не

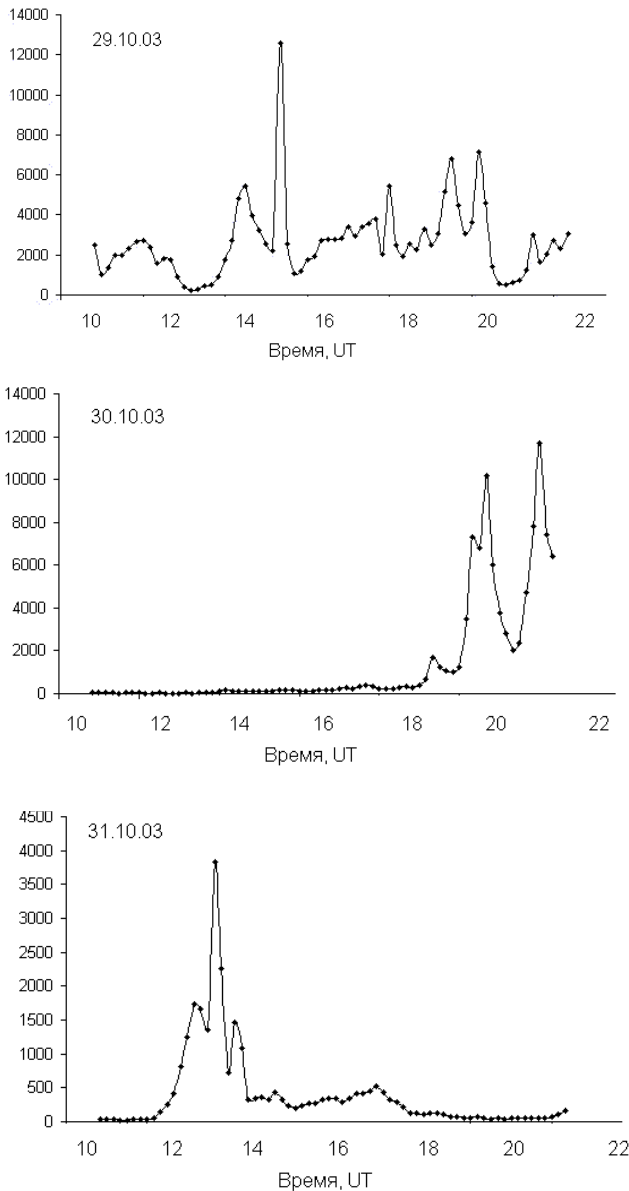


Рис. 14. Вариации яркости полярного сияния (линия атомарного кислорода OI 844,6 нм) на станции Маймага, сверху вниз: 29, 30 и 31.X.2003 г

начинались. Всплеск свечения в 14.30 UT во время описанного выше брейккапа полярных сияний - самый большой по амплитуде в Маймаге и короткий, меньше 10 мин, что соответствует типичной длительности фазы экспансии суббури.

Из других наблюдений 29.X.2003 г. отметим, что суббуря, начавшаяся около 19 UT, проявилась в двух всплесках (рис. 14), но в максимуме бухты активность резко уходит на север, и в Маймаге этой мощной суббури не видно. Отметим также, что и на магнитометрах западной цепочки в средних широтах этой суббури не видно.

30 октября сияния в Маймаге начинаются в 18.30 UT и дают два ярких всплеска в интервале 19.30 - 21.10 UT, в том же интервале времени, когда мощная суббуря регистрировалась и на западной и на восточной цепочках магнитометров и когда наблюдался самый близкий к Земле сдвиг границы проникновения СКЛ.

Риометрические наблюдения в Маймаге подтверждают, что описанные выше фотометрические наблюдения принадлежат к событиям суббурного класса: почти каждому всплеску яркости свечения соответствует всплеск риометрического поглощения типично суббуровой структуры, свидетельствующий о высыпании авроральных электронов с энергией 10 кэВ и выше. Отметим также, что вечером 30 октября в Троицке под Москвой был сделан снимок полярного сияния (см. сайт ИЗМИРАН) - лучистая дуга с нижним красным краем (сияния типа В), тип сияний, который ассоциируется обычно с активной фазой суббури [9].

**Геофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН (52°N, 103°E).** Наблюдения проводились с помощью зенитных фотометров с интерференционными качающимися светофильтрами ( $\Delta\lambda_{1/2} \sim 1-2$  нм) в линиях излучения 558 и 630 нм. Также регистрировалось излучение в ближней инфракрасной (720 - 830 нм) и ультрафиолетовой (360 - 410 нм) областях спектра, которые выделялись абсорбционными светофильтрами. Угловые поля зрения каналов фотометра составляли 4 - 5 градусов.

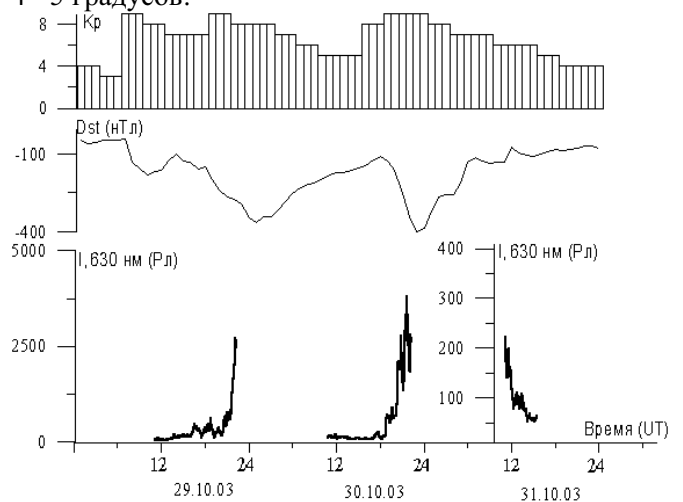


Рис. 15. Распределение Dst и Kp индексов и поведение атмосферной эмиссии 630 нм во время среднеширотных сияний на юге Восточной Сибири 29 - 30.X.2003 г.

Оптические наблюдения 29 - 31.X.2003 г. проводились в условиях сплошной облачности. Это обстоятельство могло привести к двум эффектам. Во-первых, из-за поглощения облачностью регистрируемые у поверхности Земли светимости атмосферных эмиссий должны иметь значения ниже светимостей на высотах высвечивания этих эмиссий. Во-вторых, из-за рассеяния излучения облачностью на большие углы эффективное поле зрения каналов фотометра могло иметь существенно большие величины. Это могло привести к регистрации излучения с более высокоширотных областей относительно места локализации станции наблюдения ( $>1 - 2^\circ$ ). В связи с этим был проведен предварительный учет поглощения регистрируемого излучения облачностью и данные приводились к условиям, соответствующих ясному небу.

29 - 30.X.2003 г. в геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН регистрировались среднеширотные сияния, доминирующей эмиссией в которых являлась линия атомарного кислорода 630 нм. На рис.15 представлены распределения Dst и Kp индексов и поведение атмосферной эмиссии 630 нм для трех ночей 29 - 31.X.2003 г. Для зарегистрированных среднеширотных сияний начало роста интенсивности эмиссии 630 нм ( $J_{630}$ ) и максимальных значений  $J_{630}$  соответствует главным фазам магнитных бурь. Максимальные значения  $J_{630}$  для рассматриваемых среднеширотных сияний отмечаются во вторую половину ночи, что является типичным для рассматриваемой долготной зоны [10]. Зарегистрированные и приведенные к условиям ясного неба максимальные интенсивности  $J_{630}$  во время среднеширотного сияния 30 октября ( $\sim 4,3$  кРл и  $\sim 6 - 10$  кРл, соответственно) имели наибольшие значения за весь период проведения оптических наблюдений в геофизической обсерватории (1989 - 1993 гг. и 1997 - 2003 гг.), что позволяет отнести среднеширотные сияния 29 - 30.X.2003 г. к экстремально наблюдаемым как в месте локализации геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, так и в других среднеширотных зонах.

Исключение в сторону еще большей интенсивности составит лишь среднеширотное сияние 20.XI.2003г., когда максимальные значения  $J_{630}$  превысили 19 кРл.

Сплошная облачность во время сияний не позволяет точно определить форму и тип сияний. При движении области свечения к средним широтам

чаще всего наблюдаются диффузные сияния с доминирующей эмиссией 630 нм, которые проектируются в область плазмоспаузы и могут отслеживать плазменные границы на высотах верхней атмосферы и их естественные проекции в магнитосферу: свечение ночного неба - плазмосфера, экваториальная граница слабой диффузной авроральной эмиссии - плазмоспауза, диффузная авроральная зона - плазменный слой и район кольцевого тока [11].

Вместе с тем, и южный край зоны активных сияний может в экстремальных случаях доходить до средних широт, но для того, чтобы сделать правильный выбор, следует провести дополнительные исследования.

### 3.1.3 Ионосферные эффекты над Москвой

Ниже приведены предварительные результаты анализа данных вертикального зондирования ионосферы в период ионосферно-магнитного возмущения 29 - 31 октября 2003 г.

По данным Центра прогнозов геофизической обстановки ИЗМИРАН (см. веб-сайт <http://www.izmiran.rssi.ru>), и данным вертикального зондирования ионосферы в обсерватории ИЗМИРАН ( $55^\circ$  N,  $37^\circ$  E) в этот период наблюдалась сильнейшая ионосферно-магнитная буря. Вертикальное зондирование ионосферы проводилось с помощью ионозонда "ПАРУС". Описание ионозонда приведено на веб-сайте <http://top.izmiran.troitsk.ru/parus/>. При анализе

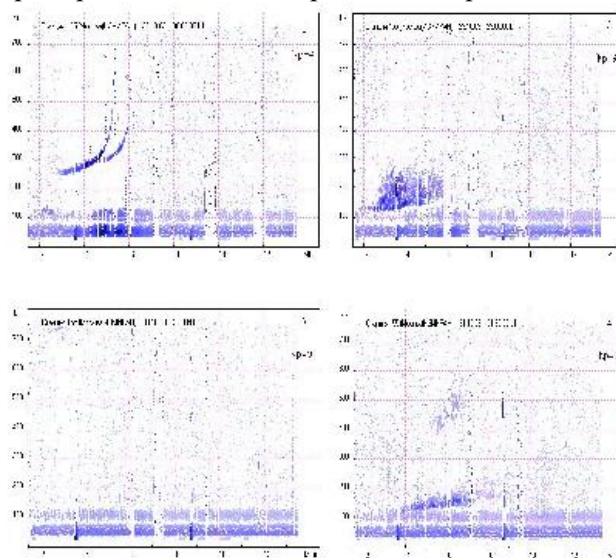


Рис. 16. Ионограммы ст. Москва (ИЗМИРАН) 29 - 30.X.2003 г.

**Таблица 1** Предварительные результаты анализа данных вертикального зондирования ионосферы над Москвой во время ионосферной бури 29-31 октября 2003 г. Особенности отраженных сигналов.

Дата, время (час.мин. LT)	Индекс Кр	Область F	Область E Тип Es
<b>29.10.2003</b>			
08.00	4	Без особенностей	
08.30	9	foF2~5.8 МГц, h'F~260 км	f
09.00	9	foF2~4.5 МГц, h'F~470 км	-
09.30-10.30	9	B	-
11.00-18.00	6	Без особенностей	-
18.30-19.30	7	F	-
20.00-21.30	9	A	s
22.00-22.30	9	B	-
23.00	9	A	a
23.30	9	B	-
<b>30.10.2003</b>			
00.00	9	A	f
00.30-01.00	9	B	-
01.30	9	A	s
01.30	9	A	s
02.00	8	F	s
02.30	8	foF2~2.5 МГц, h'F~530 км	-
03.00	8	foF2~3.5 МГц, h'F~500 км	-
03.30-04.00	8	B	-
04.30	8	foF2~2.3 МГц, h'F~500 км	-
05.00-07.30	5	Без особенностей	
08.00	4	foF2~2.3 МГц, h'F~300	-
08.30	4	B	-
09.00	4	Без особенностей	-
09.30-12.00	4	B	-
12.30-20.00	4	Без особенностей	-
20.30-22.30	9	F	-
23.00	9	A	a
23.30	9	B	-
<b>31.10.2003.</b>			
00.00	9	F	s
00.30-01.30	9	A	s
02.00	9	F	-
02.30-04.00	9	B	-
04.30	9	foF2~2 МГц, h'F~510 км	-
05.00 -	7	Без особенностей	-

данных вертикального зондирования ионосферы привлекались данные по Dst вариациям (см. рисунки предыдущих разделов).

Результаты анализа получасовых данных вертикального зондирования ионосферы для бури 29 октября представлены в таблице 1 и на рис. 16,

где приведены некоторые типичные ионограммы для этой бури.

В таблице показаны: дата, время (час. мин. UT), индекс геомагнитной активности по данным магнитной обсерватории ИЗМИРАН. Для описания состояния области F ионосферы использованы оценочные и описательные буквы, которые приняты при интерпретации и обработке ионограмм [12]. Буквы заменяют численные значения параметра отраженного сигнала тогда, когда определение может быть затруднительным или вообще невозможным: A - частичная или полная экранировка области F спорадическими образованиями в нижележащей области E; B - полное поглощение отраженных сигналов, F - сильное рассеяние отраженных сигналов. "Без особенностей" - наблюдается обычная ионограмма (см. ионограмму 1 на рис. 16), характерная для данного LT и сезона года. Местное время связано с мировым соотношением: LT = UT + 2 часа.

В колонке для области E записан тип спорадического слоя Es. Начало сильного возмущения в ионосфере во время бури 29 октября отмечено в 07.30 UT. Возмущение наблюдалось до 08.00 UT 1 ноября. В этом временном интервале на большинстве ионограмм отсутствовали какие-либо следы отраженных сигналов, что свидетельствует о развитии в ионосфере полного поглощения сигналов (ионограмма 3). В отдельные моменты появлялись рассеянные следы аврорального спорадического слоя Es типов "a" - сильно рассеянный по высоте слой (ионограмма 2), или "s" - высота которого равномерно увеличивается с ростом частоты излучения ("косой" Es) - ионограмма 4. У всех наблюдаемых Es была четко выражена нижняя граница отражений. Предельная (критическая) частота отражений от спорадического слоя составляла  $4 \div 8$  МГц. Наблюдаемые Es обычно полностью экранировали область F. Для начала возмущения были характерны резкий рост минимальной действующей высоты слоя F - h'F и резкое уменьшение критической частоты слоя, foF2, с последующим развитием или полной экранировки, или полного поглощения. Это было типично для всех трех бурь в максимуме Dst. Таким образом, мы имеем все характерные признаки высокоширотной ионосферы [13, 14].

Представляет интерес тот факт, что "попытка" восстановления вертикальной структуры области F в период развития описываемого возмущения

проявлялась на фоне разных фаз магнитных бурь. Первое восстановление отмечено вблизи минимума Dst первой бури, второе - вблизи минимума Dst второй бури, третье - на фазе восстановления второй бури и т.п. (см. таблицу 1).

В работе [15] была рассмотрена динамика главного провала электронной концентрации Ne и максимума широтного хода электронной температуры Te в зависимости от геомагнитной активности. Исходными данными исследований служили прямые измерения Te на спутнике "Космос-378" и материалы вертикального зондирования ионосферы на 11 обсерваториях 10-20 декабря 1970 г. Было получено, что на главной фазе бури в течение нескольких часов происходит резкое смещение максимума Te и провала Ne в сторону экватора и затем их плавное возвращение в исходное положение в течение нескольких суток. Смещение провала достигало  $L \sim 2$ , при этом Te на высотах максимума слоя F составляла  $\sim 5000^\circ \text{K}$ . Подобные вариации Dst ранее наблюдались в сентябре 1957 г. [14].

События в магнитосфере и ионосфере, обусловленные выдающейся активностью Солнца в октябре 2003 г., развивались аналогичным образом, хотя были значительно сложнее. Как было показано выше, в средних широтах наблюдались такие возмущения верхней атмосферы и ионосферы, которые обычно наблюдаются только в авроральной зоне в Арктике или Антарктике.

К анализу состояния ионосферы необходимо добавить, что в описанные интервалы ионосферно-магнитных возмущений над Троицком в ночь с 30 на 31 октября наблюдались полярные сияния в северном секторе небосвода - лучистая дуга с нижним красным краем (<http://www.izmiran.rssi.ru>).

### 3.1.4. Высыпания авроральных электронов. ИСЗ Метеор-3М

При смещении суббуревой активности к экватору можно ожидать и соответствующих сдвигов внутренней границы плазменного слоя и области высыпания авроральных электронов. Возможность исследовать динамику авроральных высыпаний дают нам измерения на полярном спутнике Метеор-3М. Ниже мы приводим некоторые результаты измерений авроральных электронов спектрометром МСГИ-5ЕИ. (Описание аппаратуры и ряд других результатов измерений на спутнике Метеор см. в

главе 4.)

Динамика областей высыпания малоэнергичных электронов, вызывающих свечение полярных сияний, исследовалась во многих работах (см., например, [16, 17] и соответствующие ссылки). Особый интерес представляют данные для очень сильных магнитных бурь. За последние 40 лет зарегистрировано лишь 4 бури, с Dst ниже  $-400 \text{ нТл}$ , две из них - в октябре-ноябре 2003 г.

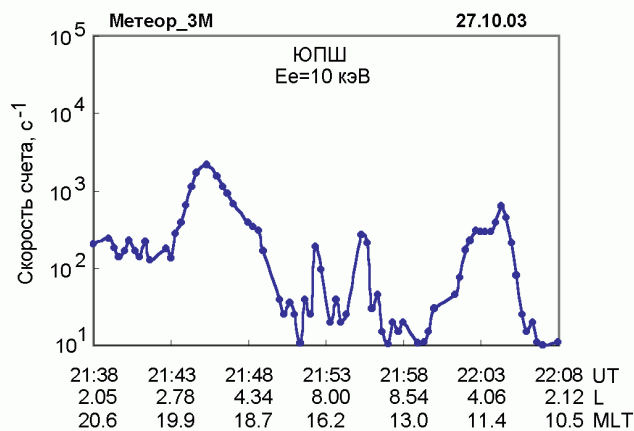


Рис. 17. Профиль скорости счета электронов с  $E_e = 10 \text{ кэВ}$ , зарегистрированный при пролете ИСЗ Метеор-3М в южном полушарии 27.X.2003 г.

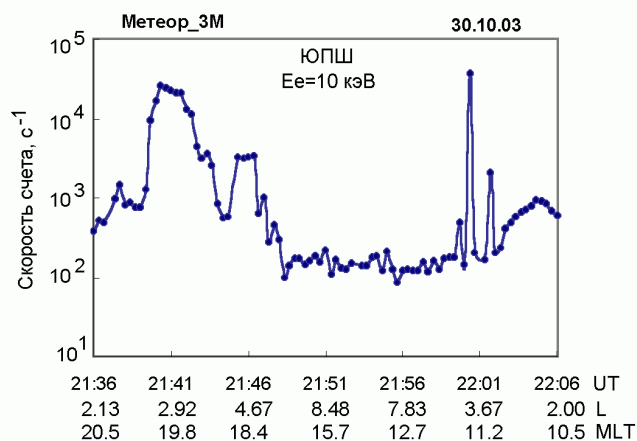


Рис. 18. То же, что на рис.5.3/17, но для пролета 30.X.2003 г.

На рис. 17 и 18 показаны профили интенсивности электронов с  $E_e = 10 \text{ кэВ}$ , зарегистрированных при пролетах ИСЗ Метеор-3М в одних и тех же областях магнитосферы в южном полушарии. На рис. 17 - в сравнительно спокойных геомагнитных условиях 27.X.2003 г., на рис. 18 - за  $\sim 1$  час до максимума бури 30.X.2003 г. В счет спектрометра 27.X.2003 г. большой вклад дали электроны внешнего радиационного пояса с энергией  $>2 \text{ МэВ}$  (см. два пика скорости счета в вечерние и дневные часы местного времени на  $L \sim 3,3$ ). С надежностью могут

быть идентифицированы лишь "авроральные" пики интенсивности на дневной стороне на  $L \sim 8$  со скоростью счета  $3 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ . Максимальная скорость счета на всем пролете составила  $3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ .

Картина резко изменилась на пролете 30.X.2003 г. (рис. 18). Максимум высыпаний электронов на вечерней стороне сместился до  $L \sim 2,8$ , на дневной - до  $L \sim 4$ , а скорость счета в максимумах возросла более чем на порядок.

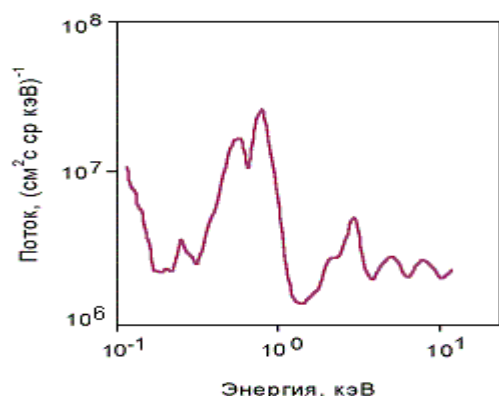


Рис. 19. Спектр электронов в максимуме интенсивности ( $L \sim 2,8$ ) в вечерние часы (MLT) 30.X.2003 г.

На рис. 19 приведен спектр электронов в диапазоне энергий 0,1 - 15 кэВ, зарегистрированный в максимуме высыпаний ( $L \sim 2,8$ ) на вечерней стороне в пролете, приведенном на рис. 18. Спектр имеет максимум на энергиях  $\sim 1$  кэВ, что типично для спектров авроральных электронов в структурах типа "перевернутого V". Главная фаза супербури 30.X.2003 г. развивалась очень быстро, мощные суббури следовали одна за другой. Предварительный анализ геомагнитных данных SAMNET и ИЗМИРАН показывает, что в конце главной фазы бури центр западной электроструи смещался, по крайней мере, до зенита станции Борок ( $L \sim 2,9$ ). На станции Москва ( $L \sim 2,6$ ) Z-компонента магнитного поля (рис. 10) все это время оставалась отрицательной (электроструя севернее Москвы).

## 3.2. ДЛИННОПЕРИОДНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ

### 3.2.1. Дневные пульсации диапазона Pc5

Одним из ярких проявлений большой магнитной бури в октябре 2003г. было возбуждение в дневное время 29 и 31 октября геомагнитных пульсаций Pc5, характеризующихся необычно большой (до 600 нТл) амплитудой с максимумом в спектре в полосе

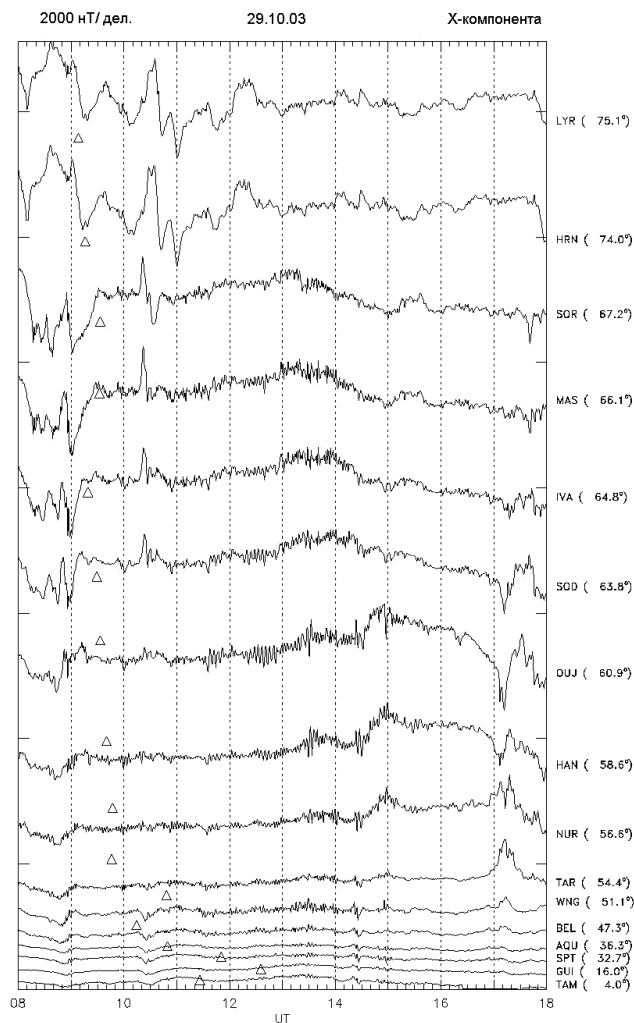


Рис. 20. Магнитограммы на скандинавском профиле обсерваторий (дневной сектор) 29.X.2003 г. на широтах от полярной шапки до экватора

частот 2,5 - 5,0 мГц (периоды порядка 3 - 6 мин). Рассмотрим особенности и динамику развития этих пульсаций подробнее. В анализе были использованы данные 1-мин регистрации на глобальной сети из 80 наземных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ (INTERMAGNET), скандинавского профиля IMAGE (19 станций) и европейской сети SAMNET (7 станций, включая российскую обсерваторию Борок). На рис. 20 и 21 приведены соответственно магнитограммы за 29 и 31 октября на некоторых обсерваториях дневного сектора на широтах от полярной шапки до экватора, построенные в одном масштабе. На графиках треугольники показывают положение местного магнитного полдня, справа - международный код обсерваторий и их геомагнитная широта. Видно, что в обоих случаях в дневном секторе магнитосферы наблюдаются

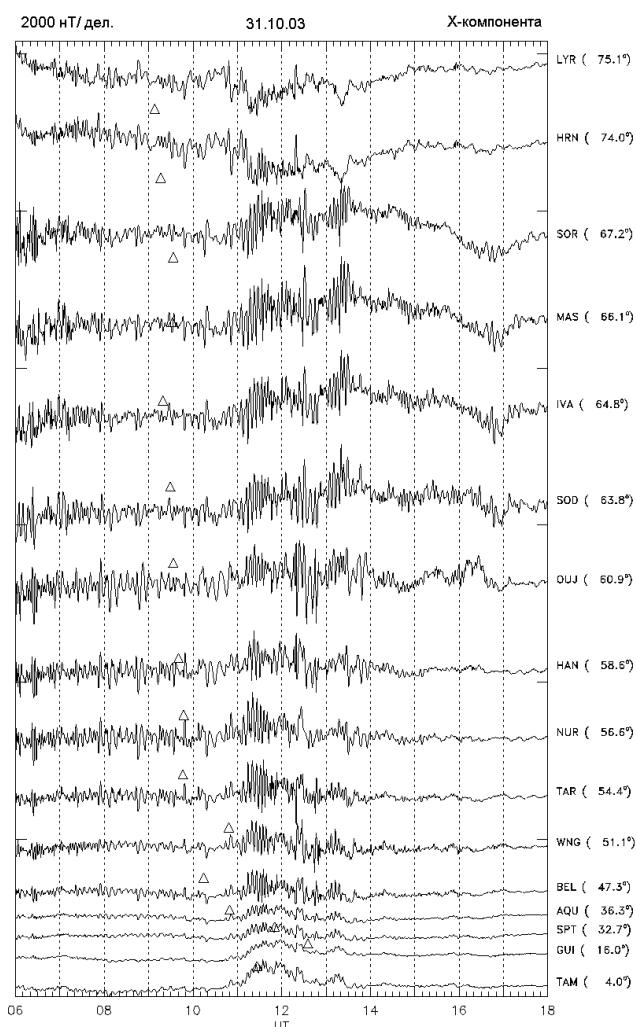


Рис. 21. Магнитограммы, аналогичные рис. 8.1/20, но для 31.X.2003 г.

четкие длительные квазимонохроматические колебания, спектральный анализ которых показал наличие отчетливого максимума в полосе частот 2,5 - 5,0 мГц.

Для исследования их пространственно-временных особенностей по разработанным в ИФЗ программам были построены карты изолиний интегральной интенсивности (нТл/мГц) геомагнитных пульсаций в полосе 2,5 - 5,0 мГц (максимум спектра) в координатах исправленная геомагнитная широта - местное магнитное время. Интервал UT, для которого проводились вычисления, показан сверху каждой карты, звездочки - положение обсерваторий и их международный код. Для каждого дня карты построены в одном масштабе (для разных дней он разный).

На рис. 22 представлены две карты, построенные по

усредненным за один час данным, для двух временных интервалов 12 - 13 UT и 13 - 14 UT 29.X.2003 г. Видно, что наибольшая активность пульсаций отмечалась в двух областях пространства

29.10.2003 2.5 - 5.0 мГц

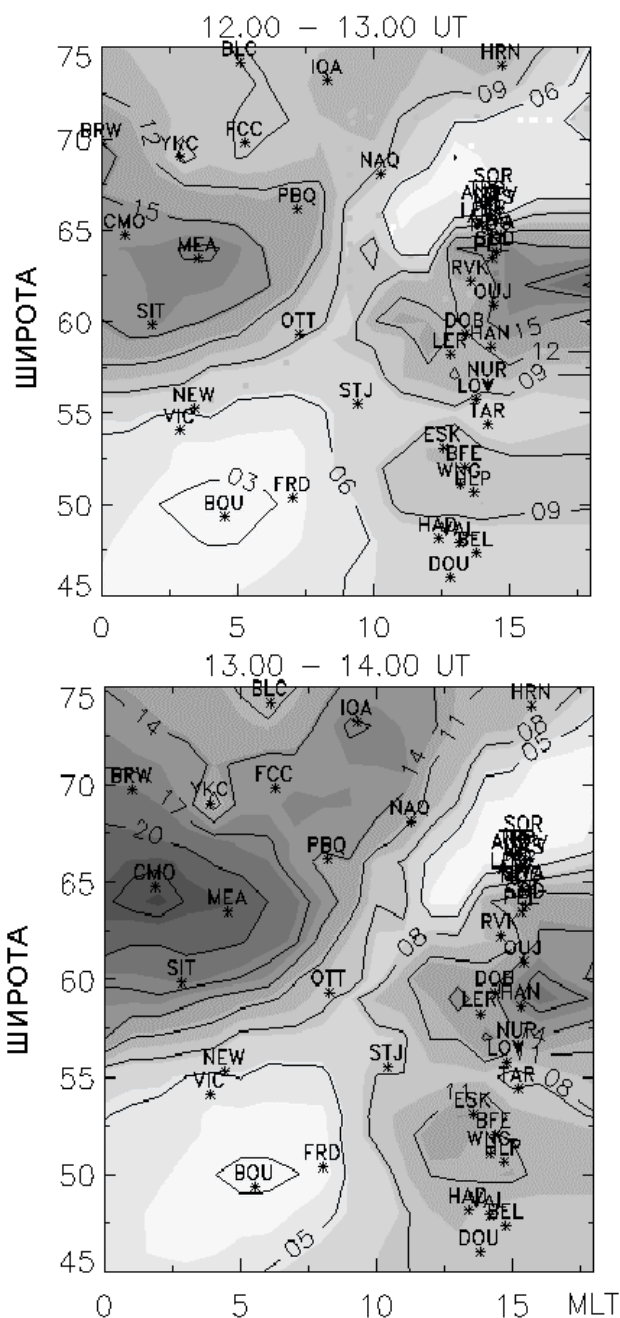


Рис. 22. Карты распределения интегральной интенсивности (нТл/мГц) геомагнитных пульсаций в полосе 2,5 - 5,0 мГц (максимум спектра) 29.X.2003 г. в координатах исправленная геомагнитная широта - местное магнитное время. Интервал UT показан сверху каждой карты, звездочки - обсерватории и их международный код.

- в послеполуночном и послеполуденном секторах авроральной зоны, разделенных четким минимумом. При этом наблюдалась необычная пространственно-временная динамика амплитуды колебаний. В часовом интервале с 12 - 13 UT до 13 - 14 UT максимум интенсивности послеполуночных Pc5 вырос и переместился по долготе в сторону полуночи (с 04 MLT на 02 MLT), а по широте - на более высокие геомагнитные широты (с 63,5° на 64,7°). Максимум послеполуденных Pc5 также

низкие широты (с 62,5° на 58,5°). Одновременно появился небольшой максимум в околополуденное время в полярных широтах (касп?).

На рис. 23 приведены две карты пространственного распределения амплитуд Pc5 31 октября. Видно, что в этот день, в противоположность предыдущему случаю (29 октября), пространственно-временное распределение и динамика Pc5 были совершенно иными. Пульсации наблюдались только в околополуденном - послеполуденном секторе. Можно было выделить две широтные зоны. В 11 - 12 UT наиболее интенсивная, высокоширотная (65 - 70°) зона простиралась далеко в утренний сектор (почти до 04 MLT). В низкоширотной зоне (52 - 57°) в это время утром пульсаций не наблюдалось. Через час долготная протяженность обеих зон стала подобной, амплитуды пульсаций уменьшились. Максимум интенсивности Pc5 в высокоширотной зоне сместился с 66 - 69° на 62 - 66°, а в низкоширотной - с 55° на 51°.

Можно предположить, что источники и механизмы генерации Pc5 колебаний 29 и 31 октября были различны. Если по морфологическим характеристикам пульсации Pc5, наблюдаемые в послеполуденное время 29 октября, можно отнести к широко обсуждаемым в литературе альвеновским резонансным колебаниям (см., например, [18]), то Pc5 пульсации в утреннем секторе того же дня и пульсации 31 октября не могут быть объяснены в рамках этого механизма. В наблюдаемых пульсациях не отмечалось смены знака поляризации колебаний при переходе через максимум амплитуд, что характерно для резонансных волн. Источником этих колебаний вряд ли является глобальная магнитосферная мода (cavity mode), как это было, например, во время большой магнитной бури 24 марта 1991 г. [19] и бури 21 февраля 1994 г. [20], поскольку частоты наблюдаемых Pc5 значительно выше частот, типичных для глобальной моды.

Источником послеполуночных иррегулярных колебаний, наблюдаемых в авроральных широтах 29 октября в 12 - 14 UT, могут быть флуктуации продольных электрических токов и соответствующих вторжений энергичных электронов, как это обсуждалось в работах [21, 22]. Можно предположить, как это было сделано в работе [22], что генерация дневных Pc5 пульсаций связана с вторжением в ионосферу протонов кольцевого тока. Однако такое предположение

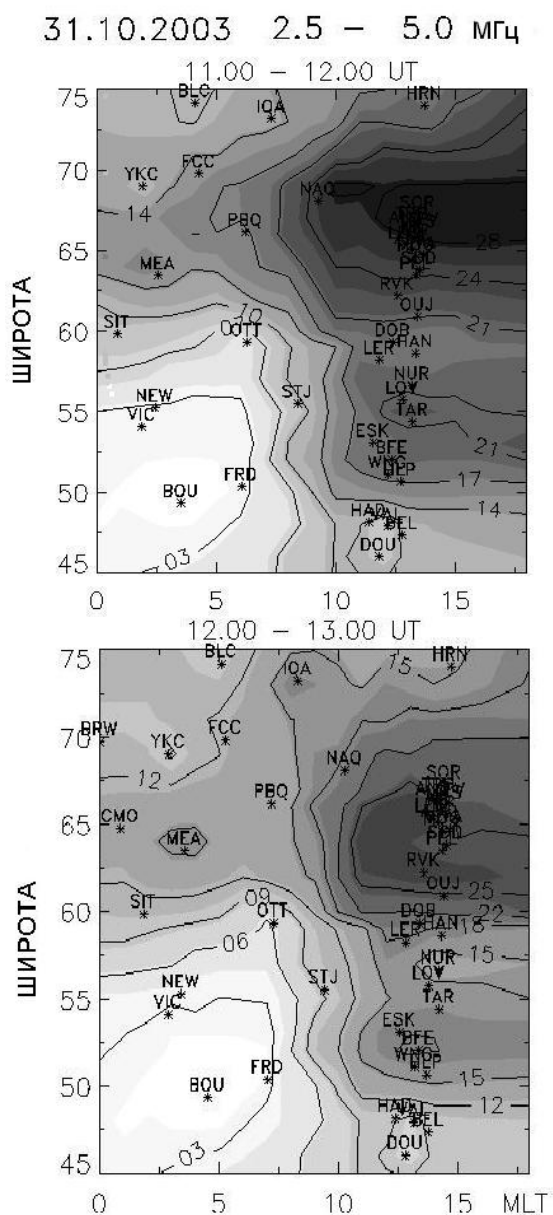


Рис. 23. То же, что и на рис. 22, но для 31.X.2003 г.

слегка переместился по долготе на запад, а по широте - в противоположную сторону, т.е. на более



требует экспериментального подтверждения. Кроме того, остается ряд вопросов, на которые пока нет ответов. Например,

- Что является источником начала резкого возрастания амплитуды пульсаций?
- Почему пульсации так резко оканчиваются?
- Что определяет широтные размеры области повышенных амплитуд Pc5?
- Что привело к появлению двух широтных зон послеполюденных Pc5?
- Почему наблюдается долготная асимметрия (относительно полдня) Pc5?

### 3.2.2. Ночные геомагнитные пульсации Pi2-3 во время суббури

Наиболее интенсивные суббури наблюдались в главную фазу магнитной бури 30X в 18-22 UT.

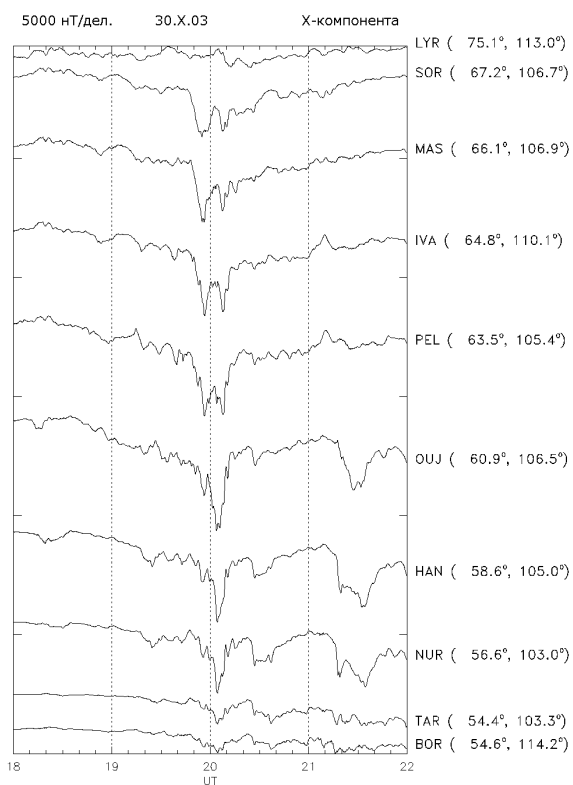


Рис. 24. Магнитограммы ночного сектора 30.X.2003 г.: X компонента поля (а) и Z компонента (б). Справа приведены код обсерваторий и их геомагнитные широта и долгота

На рис. 24а,б приведены магнитограммы (X и Z компоненты, соответственно) некоторых обсерваторий ночного сектора (ромбики - местная геомагнитная полночь). Около 20 UT наблюдалась очень большая (почти до 3000 нТл) суббурия,

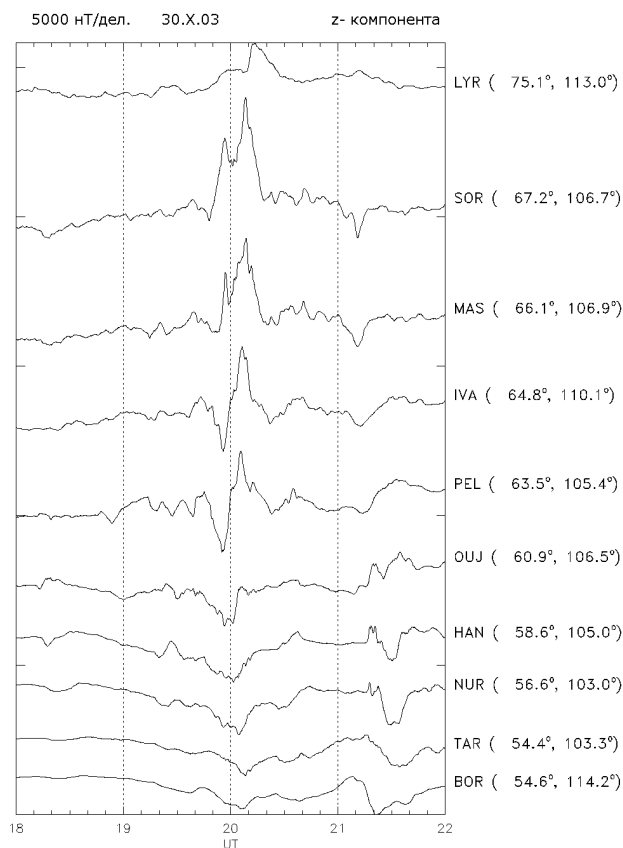


Рис. 24б

включавшая две интенсификации: одну - за несколько минут до 20 UT, а вторую, более сильную - после 20 UT. Из соотношения X и Z компонент видно, что за указанный интервал времени центр электроструи скачком переместился с геомагнитной широты  $\sim 65,5^\circ$  на широту  $\sim 61^\circ$ . Ещё одна, менее интенсивная суббурия наблюдалась между 21 и 22 UT на геомагнитных широтах  $\sim 55^\circ - \sim 62^\circ$ .

Все рассмотренные суббури сопровождалась всплесками риометрического поглощения и геомагнитными пульсациями в полосе частот 1 - 15 мГц, т.е. в диапазоне Pi3 и Pi2. В спектре колебаний помимо традиционного усиления вариаций в полосе 1 - 2 мГц, которые можно считать высокочастотным продолжением суббуревых токовых вариаций DP2, отмечались амплитудные максимумы в полосе 3,5 - 5,0 мГц (периоды порядка 4 - 5 мин, диапазон Pi3) и в полосе  $\sim 6 - 15$  мГц (периоды порядка 60 - 150 с, диапазон Pi2).

Для изучения пространственно-временных вариаций интенсивности этих пульсаций были построены карты изолиний интегральной интенсивности колебаний (нТл/мГц) в координатах исправленная геомагнитная широта - местное геомагнитное время.

Карты оказались практически идентичными для колебаний Pi3 и Pi2, что свидетельствует об их общем источнике. На рис. 25 представлены карты изолиний интенсивности Pi2 для трех интервалов времени, включающих две интенсификации первой суббури (19 - 20 UT и 20 - 21 UT) и последующую суббурю в 21 - 22 UT.

30.10.2003 6.0 - 15.0 МГц

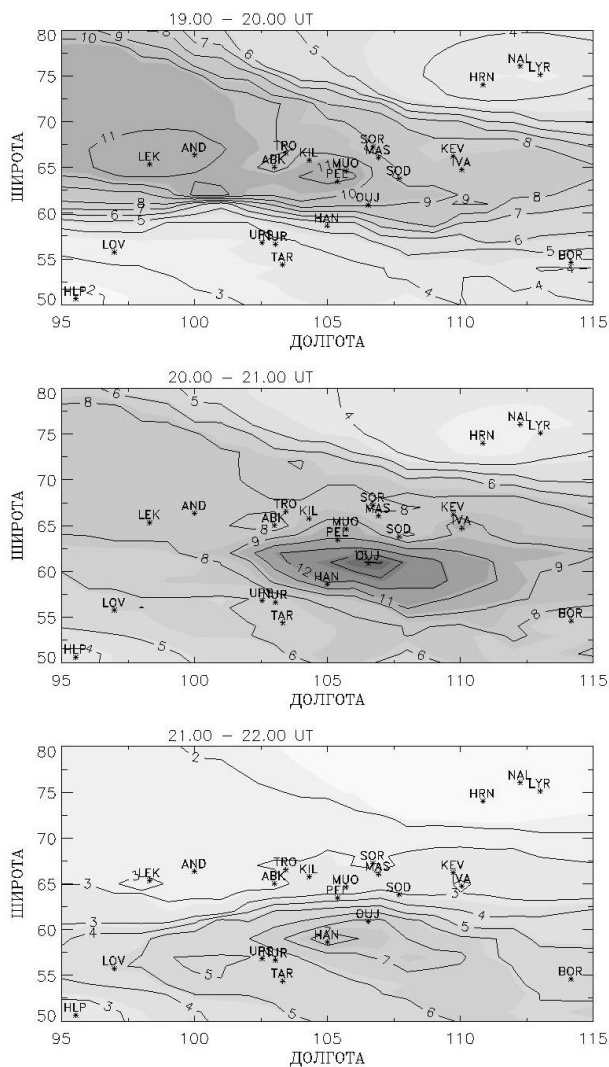


Рис. 25. Карты изолиний интегральной интенсивности (нТл/мГц) геомагнитных пульсаций Pi2 для трёх обсуждаемых временных интервалов 30.X.2003 г.: 19.00 - 20.00 UT (а), 20.00 - 21.00 UT (б) и 21.00 - 22.00 UT (в).

Как правило, область появления иррегулярных геомагнитных пульсаций на земной поверхности и область развития авроральной электроструи совпадают. Из карт на рис. 25 видно, что вначале, при первой интенсификации суббуревой активности пульсации отмечались в относительно небольшом интервале геомагнитных широт - выше 65°. Затем

амплитуда Pi2 пульсаций резко возросла, а область её максимальных значений стала очень узкой ( $\lambda = 62 - 63^\circ$ ) переместилась к юго-востоку. В суббурю максимума главной фазы магнитной бури (21 - 22 UT) пульсации Pi2 наблюдались в большой области пространства на необычно низких геомагнитных широтах (от 60° до 50° и ниже) с максимумом на широте примерно 58°. По-видимому, такую же пространственно-временную динамику имела и авроральная электроструя.

### 3.3. ОНЧ - ИЗЛУЧЕНИЕ В ЯКУТСКЕ

Регистрация ОНЧ-излучения проводилась на станции Якутск (ИКФИА) на 11 дискретных частотах от 0,47 до 8,7 кГц. На рис. 26 - 29 представлены результаты измерений ОНЧ-излучения 28 - 31.X.2003 г. Измерения на нескольких частотных каналах расположены сверху вниз по нарастающей частоте, амплитуда вариации дана в логарифмическом масштабе в относительных единицах.

28.X.2003 г. является днем с ОНЧ возмущениями. Всплески ОНЧ-излучения наблюдались, в основном, на частотах до 6,7 кГц (до канала 6,7 кГц ОНЧ-регистратора). Начало основных вариаций 28.X.2003 г. обусловлено магнитосферными

Yakutsk, VLF, 28.10.03

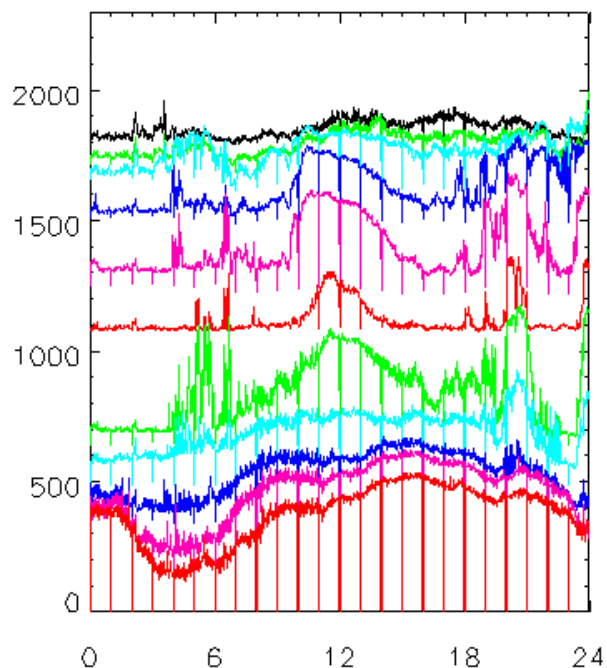


Рис. 26. Интенсивность ОНЧ излучения согласно измерениям 28.X.2003 г. на частотах 0,47, 0,73, 1,6, 3,1, 5,6 и 8,7 кГц.

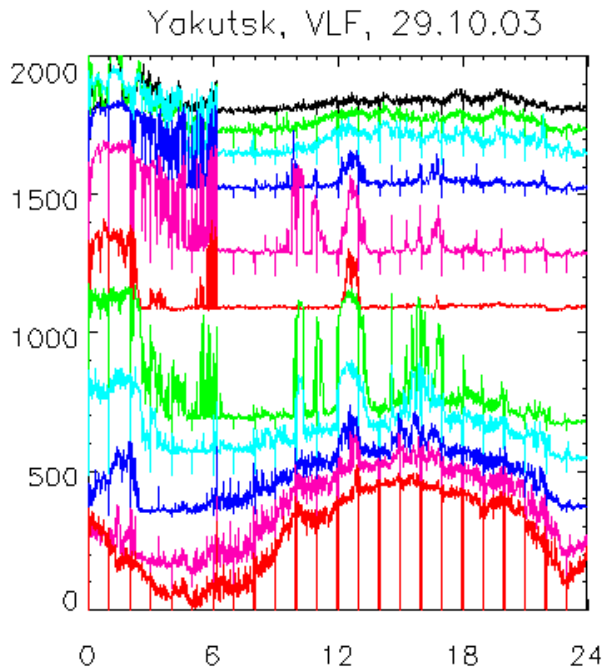


Рис.27. То же, что на рис. 9.1/26, но для 29.X.2003 г.

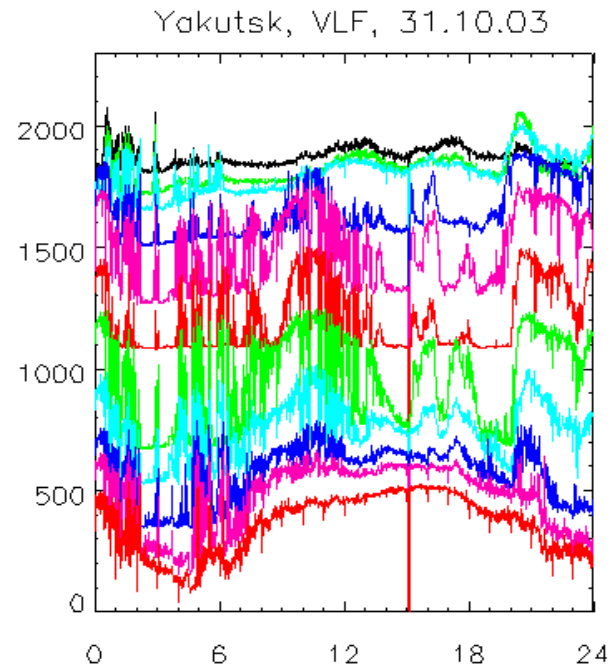


Рис.29. То же, что на рис. 9.1/26, но для 31.X.2003 г.

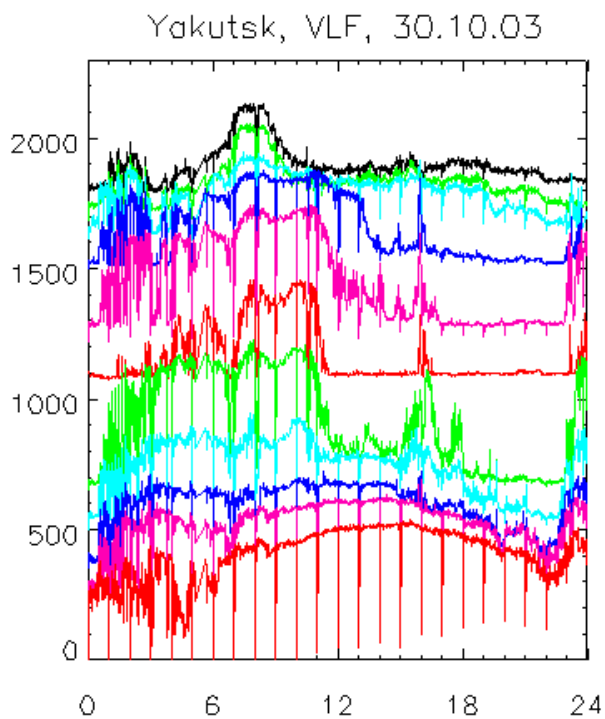


Рис.28. То же, что на рис. 9.1/26, но для 30.X.2003 г.

процессами (небольшие Dst-вариации), так как внешний радиационный пояс, с которым обычно связывается возбуждение ОНЧ-излучений, был сформирован (максимум интенсивности потоков электронов во внешнем радиационном поясе приходился на  $L = 3,3$  (см. гл.4). Последующие

всплески ОНЧ-излучения, возможно, уже связаны с усилением потоков энергичных электронов, наблюдавшиеся, в частности, на спутнике Коронас-Ф. В конце суток развивается новое ОНЧ-возмущение с расширением спектра в сторону увеличения частоты, продолжившееся 29.X.2003 г.

Данное возмущение привело, по-видимому, к частичному опустошению пояса, отмеченному в разделе 4.1, что при слабом источнике частиц (слабой инжекции во внутреннюю магнитосферу) за 4 часа до SC начало проявляться в переходе от квазипостоянного уровня ОНЧ-излучения к почти пиковому режиму. В моменты квазипериодической вариаций ОНЧ-излучения средний интервал между пиками составлял около 2 - 6 мин. Внезапный импульс SC в 06.12 UT проявился в широкополосном импульсе ОНЧ-излучения (верхняя частота более 10 кГц) значительной амплитуды, после чего произошел срыв генерации ОНЧ-излучения во всем диапазоне частот.

Восстановление произошло только в 10 UT: регистрировались отдельные всплески излучения, соответствующие положительным вариациям поля Dst. Однако последующее сильное магнитное возмущение проявилось в ОНЧ-излучении только на следующие сутки, 30.X.2003 г., т.е. на фазе восстановления магнитной бури. При этом характер записи, обратный тому, который наблюдался в

начале предыдущих суток, указывает на возрастание мощности источника энергичных электронов. Преобладающие значения периодов следования пиков в моменты квазипериодической модуляции ОНЧ-излучения находятся в тех же пределах, что и 29.X.2003 г.

Затем, по тому же сценарию, во второй половине суток 30.X.2003 г. всплески ОНЧ-излучения на главной фазе следующей бури практически отсутствовали, а на фазе восстановления с 22 UT началось сильное ОНЧ-возмущение, сопровождающее глубокой (до 100 %) модуляцией амплитуды с теми же периодами 2 - 6 мин. Модуляция продолжалась всю первую половину суток 31.X.2003 г. Данный диапазон периодов следования пиков, наблюдавшийся в ОНЧ-излучении на ст. Якутск в течение 3 суток (в первой половине каждых UT суток - в дневные часы), соответствует периоду геомагнитных пульсаций Pc5. В этой связи представляют интерес пульсации Pc5, регистрировавшиеся в период магнитных бурь и рассмотренные в предыдущем разделе. Совпадение периодов следования пиков с периодом геомагнитных пульсаций Pc5, а также незначительная дисперсия в пиках ОНЧ-излучения позволяют говорить о том, что пульсации способствовали модуляции ОНЧ-излучения. В то же время, как следует из магнитных данных ст. Якутск, пульсации Pc5 до момента SC 29.X.2003 г. не регистрировались.

### 3.4 ДИНАМИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ. МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ.

Данные по солнечному ветру в окрестности Земли позволяют определить основные параметры магнитосферы. В параболоидной модели используется пять таких параметров [23]. Прежде всего, это угол наклона геомагнитного диполя к оси Z солнечно-магнитосферной системы координат,  $\psi$ . Он однозначно определяется датой и мировым временем и характеризует сезонные и суточные вариации магнитосферного поля.

Магнитный поток в долях хвоста магнитосферы (или поток в полярной шапке),  $\Phi_s$ , является другим важным параметром магнитосферы. При проведении модельных расчетов мы использовали для  $\Phi_s$  следующее выражение:

$$\Phi_{\infty} = \Phi_0 + \Phi_s$$

где  $\Phi_0$  – магнитный поток в долях хвоста магнитосферы в спокойные периоды, а  $\Phi_s$  – магнитный поток, связанный с усилением токовой системы хвоста магнитосферы во время суббуревых возмущений:

$$\Phi_0 = 3,7 \cdot 10^8 B\bar{b}$$

$$\Phi_{\infty} = -AL \frac{\pi R_1^2}{14} \sqrt{\frac{2R_2}{R_1} + 1}$$

AL индекс был получен оцифровкой предварительных данных, приведенных графически на сайте МЦД С2 в Киото,  $R_1$  и  $R_2$  - расстояния до подсолнечной точки на магнитопаузе, и до переднего края токового слоя хвоста магнитосферы, соответственно.  $R_1$  определялось по модели [24] из данных измерений в солнечном ветре скорости и плотности плазмы, а также  $V_z$  компоненты ММП.  $R_2$  определялось проектированием экваториальной границы овала полярных сияний. Эта граница находилась по формуле [25] с использованием предварительных данных о Dst индексе, также полученных на сайте МЦД С2.

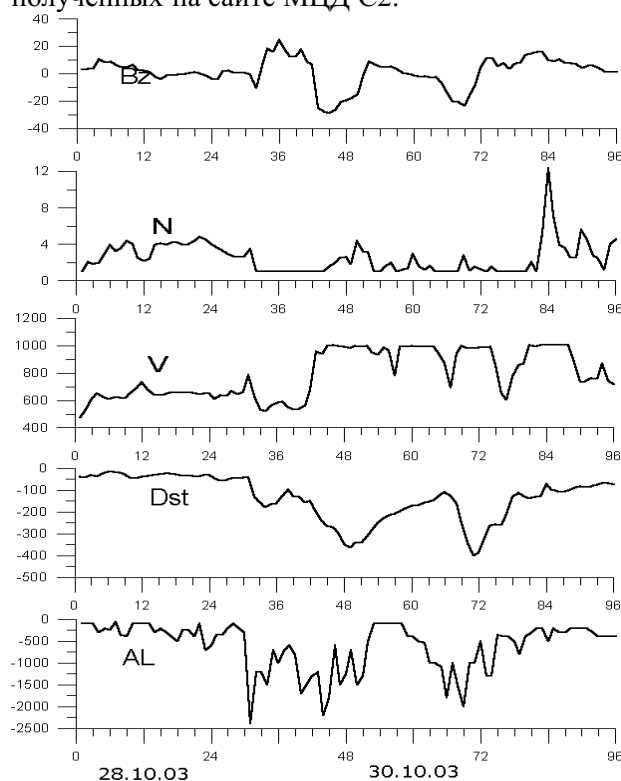


Рис. 30. Исходные данные о параметрах межпланетной среды и геомагнитной активности во время бури 28 - 31.X.2003 г.

Магнитное поле кольцевого тока в центре Земли,  $b_r$ , - пятый параметр модели магнитосферы, который, в соответствии с уравнением Десслера-Паркера-Скопке, пропорционален полной энергии захваченных частиц в области кольцевого тока. Этот параметр характеризует интенсивность кольцевого тока во время магнитной бури и может быть определен из уравнения Бартона, которое описывает динамику кольцевого тока во время магнитной бури как суперпозицию двух процессов: инъекции плазмы из области геомагнитного хвоста и распада кольцевого тока [26]. Более подробно параметры модели магнитосферы и методика расчетов описаны в работе [23]. Набор эмпирических данных, необходимых для определения параметров магнитосферы  $\psi$ ,  $\Phi_8$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  и  $b_r$ , включает в себя Dst, AL индексы, а также Vz компоненту ММП, скорость и плотность солнечного ветра.

В вычислениях использовались данные протонного монитора, установленного на КА SOHO. Хотя данные по скорости являются не совсем точными, эти измерения являются наиболее полными из всех, представленных в настоящее время в мировой сети, что позволяет провести анализ динамики магнитного поля в течение всего интервала 28 - 31 октября 2003 года.

На рис. 30 показаны исходные параметры солнечного ветра: Vz компонента ММП (по данным ACE), плотность N и скорость V (данные протонного монитора SOHO), а также, полученные из Киото геомагнитные индексы Dst и AL. Представлены среднечасовые значения. Данные ACE и SOHO приведены с учетом времени распространения от точки либрации до Земли.

По данным измерений, представленным на рис. 30 были рассчитаны временные профили параметров магнитосферы. На рис. 31 приведены параметры модели магнитосферы  $\psi$ ,  $\Phi_8$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  и  $b_r$ . Заметно, что в течение 29 - 30 октября лобовая магнитопауза несколько раз оказывается на расстояниях ближе 6,6 радиусов Земли.

Магнитосферное магнитное поле Земли рассчитывается в параболоидной модели как сумма

$$\vec{B}_2 = \vec{B}_{sd}(\psi, R_1) + \vec{B}_t(\psi, R_1, R_2, \Phi_\infty) + \vec{B}_r(\psi, b_r) + \vec{B}_{sr}(\psi, R_1, b_r)$$

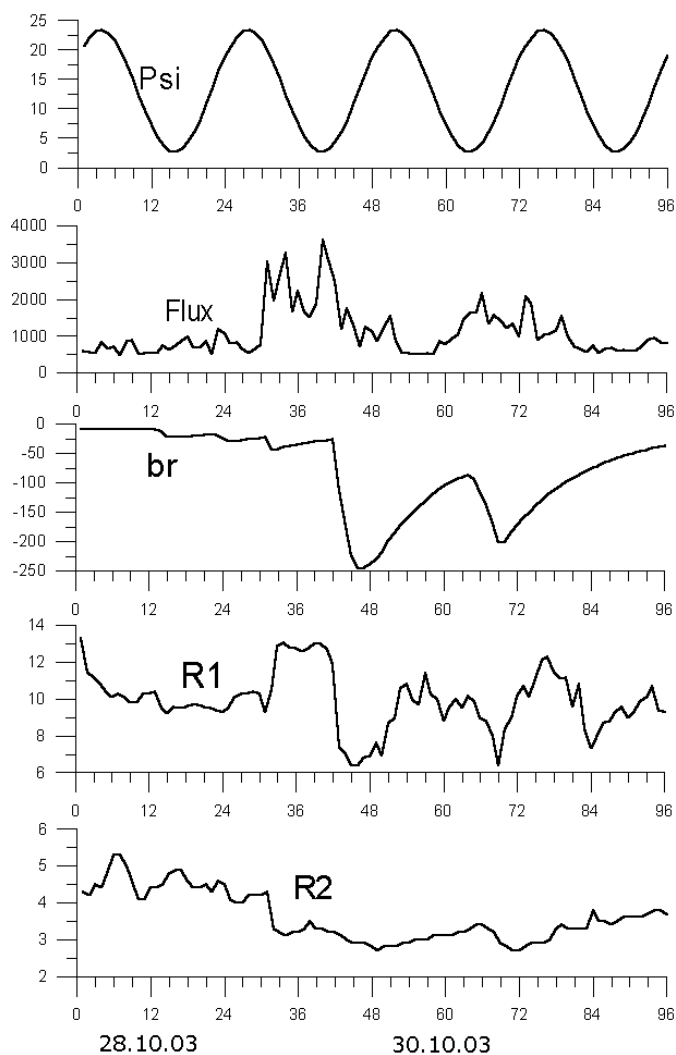


Рис. 31. Рассчитанные по экспериментальным данным ключевые параметры магнитосферы во время бури 28 - 31.X.2003 г.

Вычитая из поля магнитосферных источников вариацию спокойного дня, которая была рассчитана для «спокойных» условий в солнечном ветре ( $V = 400$  км/с,  $N = 5$  см<sup>-3</sup>,  $b_z = 0$  нТл, Dst = -5, AL = 0), и учитывая вклад земных диамагнитных токов, препятствующих проникновению магнитосферного магнитного поля внутрь Земли (30% от вариации), получаем

$$Dst = DCF + DT + DR.$$

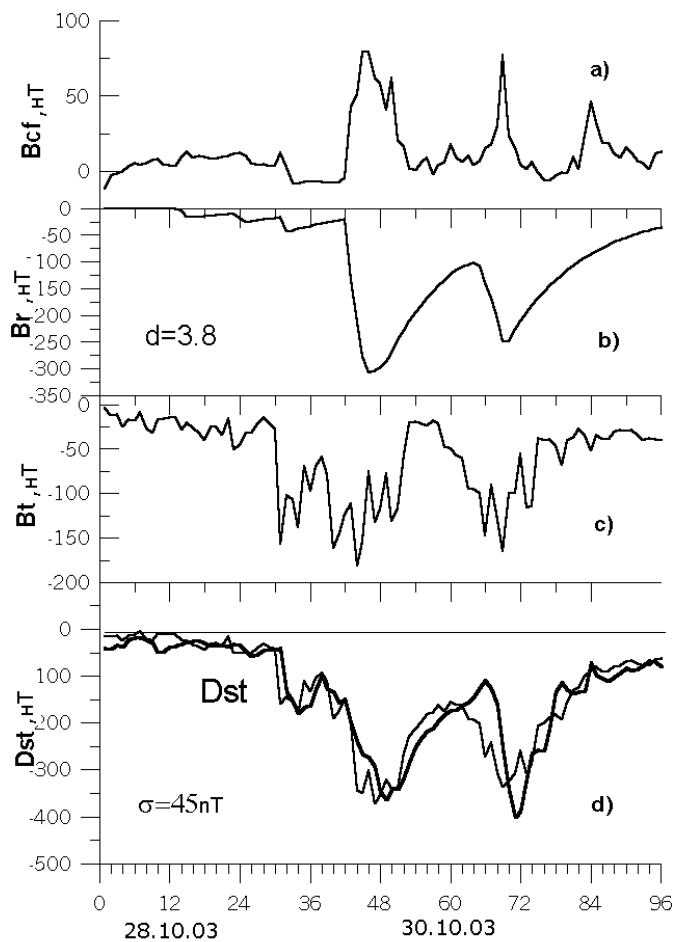


Рис. 32. Рассчитанные по экспериментальным данным вклады в Dst токов на магнитопаузе (а), кольцевого тока (б) и токового слоя хвоста (в), а также сравнение Dst, рассчитанного по модели (тонкая линия) с данными МСД-2, Kuoto (д)

На рис. 32 приведены вклады в Dst токов на магнитопаузе (а), кольцевого тока (б) и токового слоя хвоста (в). На рис. 32(г) приведено сравнение измеренного и рассчитанного Dst для интервала 28 - 31 октября 2003 года.

Среднеквадратичное отклонение равно 45 нТл, что составляет величину порядка 11% от максимума Dst. Наибольшее расхождение наблюдается во время главной фазы заключительной бури в полночь 30 октября, что может быть связано с недостаточно надежным определением параметров солнечного ветра протонным монитором SOHO.

Резюмируя можно сказать, что магнитная буря в октябре 2003 года относится к наиболее мощным геомагнитным возмущениям в текущем цикле солнечной активности. Модель магнитосферы,

описывающая динамику глобальных магнитосферных токовых систем во время магнитной бури [23], позволяет достаточно точно предсказать поведение Dst вариации по параметрам межпланетной среды.

Авторы данного раздела статьи полагают, что результаты модельных расчетов демонстрируют существенную роль токового слоя хвоста магнитосферы в формировании Dst вариации на разных фазах бури. Недавние публикации группы ученых из Лос-Аламоса [27] содержат экспериментальные свидетельства доминирующей роли токового слоя хвоста магнитосферы в формировании депрессии геомагнитного поля вплоть до максимума главной фазы (Dst до -350 нТл) магнитной бури 31 марта 2001 г. Соответствующее предсказание (о значительной роли токового слоя во время магнитной бури) было сделано российскими исследователями (Ю.П. Мальцевым, Я.И. Фельдштейном и сотрудниками НИИЯФ МГУ - И.И. Алексеевым, В.В. Калегаевым, Е.С. Беленькой) еще в 1993 - 1996 годах [28, 29]. (Более подробно эти представления о геометрии магнитосферы во время бури, разделяемые не всеми авторами коллаборации, развиты в отдельной статье настоящего сборника).

Во время падения коронального выброса массы на магнитосферу 28 - 31 октября 2003 года наблюдалось три последовательных инжекции энергичных частиц в зону кольцевого тока. По существу мы имеем дело с тремя последовательными бурями, наложившимися друг на друга. Во время первой бури вклад токового слоя был преобладающим. Геомагнитная активность напрямую контролировалась солнечным ветром. Роль накопления энергии во внутренней магнитосфере была относительно невелика. Два последующих возмущения связаны с формированием и распадом кольцевого тока.

Другим уникальным свойством мощных магнитных бурь, связанных с плотными выбросами корональной массы, движущимися от Солнца с высокой скоростью, является сильное сжатие магнитосферы. Динамическое давление солнечного ветра внутри коронального выброса было столь велико, что магнитопауза неоднократно пересекала геосинхронную орбиту. Во время главной фазы бури 29.X.2003 г. магнитометры геостационарных спутников в течение 6 часов фиксировали поле

южного направления (противоположного земному полю) около 150 нТл. Это говорит о том, что аппараты находились за магнитопаузой в переходном слое, а возможно, выходили и за его пределы, в солнечный ветер.

## 4. ДИНАМИКА ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТОСФЕРЕ.

### 4.1 Солнечные космические лучи (СКЛ) в магнитосфере Земли.

Одна из главных особенностей магнитной бури - перенос активных процессов во внутреннюю магнитосферу. На дневной стороне граница магнитосферы смещается к Земле с 10 до 6 Re и глубже, в результате чего геостационарные спутники оказываются на некоторое время вне магнитосферы. На ночной стороне границы овала полярных сияний смещаются к Земле, экваториальная - до  $50^\circ$ , а приполюсная - до  $60^\circ$  [16]. Значительные изменения претерпевают радиационные пояса Земли, наблюдается и опустошение, сброс частиц и ускорение, и радиальный перенос.

Ценную информацию об изменении конфигурации геомагнитного поля во время геомагнитных возмущений можно получить, используя солнечные космические лучи в качестве диагностического зонда.

В НИИЯФ МГУ разработан метод диагностики различных структурных областей в магнитосфере: плазменного слоя, дневного полярного каспа, кольцевого тока, границ полярной шапки на основе анализа малоэнергичных СКЛ [30 - 34].

Наиболее детально корреляционные связи между широтой геомагнитного обрезания и индексами геомагнитной активности были изучены на большом массиве данных для протонов с  $E_p > 1$  МэВ, измеренных на ИСЗ серии Космос в 1972 - 1977 гг. [35]. Подробнее о границах проникновения СКЛ - в разделе 4.1.4.

Измерения СКЛ на спутниках Коронас-Ф, Метеор-3М и Экспресс в октябре 2003 г. позволили получить ценную информацию 1) - о потоках солнечных протонов, электронов и ядер в полярной шапке, 2) - о потоках солнечных протонов на геостационарной орбите, 3) - о динамике границы полярной шапки по измерениям энергичных электронов солнечного происхождения, 4) - о

динамике границ проникновения солнечных протонов в область квазизахвата. Ниже мы представим последовательно результаты предварительного анализа этих измерений.

#### 4.1.1. Потоки СКЛ в полярной шапке

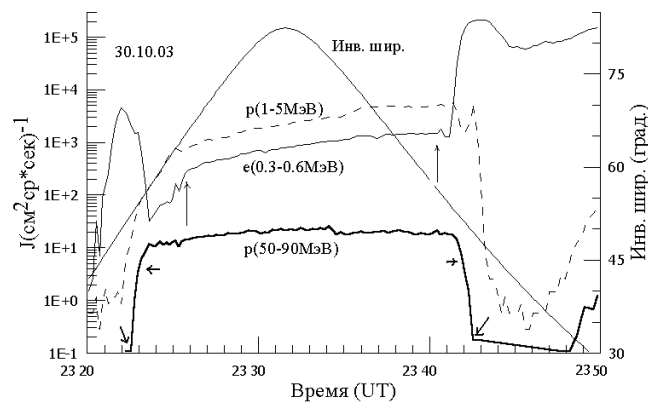


Рис. 33. Пример измерений потоков энергичных частиц на спутнике Коронас-Ф при пролете радиационных поясов, авроральной зоны и полярной шапки 30.X.2003 г.

Низковысотный спутник Коронас-Ф с полярной орбитой ( $h \sim 500$  км,  $i = 82,5^\circ$ , Тобр = 94,5 мин) имел на борту детекторы частиц МКЛ и СКИ описанные в [37]. Коронас-Ф проходит полярные шапки, силовые линии которых уходят в хвост магнитосферы и практически открыты для вхождения СКЛ, поэтому значительных отличий от временного хода в солнечных частиц в МП там нет. Зона квазизахвата частично открыта, глубина проникновения зависит от энергии (жесткости) и типа частиц. На рис.33 приведена зависимость от времени потоков протонов и электронов для одного пролета спутника через полярную шапку 30.X.2003 г. в максимуме главной фазы магнитной бури. В магнитосфере присутствуют протоны и электроны солнечного происхождения с энергией от 1 до нескольких сот МэВ, они равномерно заполняют полярную шапку и частично - наружную сторону радиационного пояса. Стрелками показаны границы проникновения электронов и протонов. Проекция фоновой границы проникновения СКЛ совпадает с положением максимума электронов возмущенного внешнего пояса, что характерно и для спокойных периодов. Солнечные электроны не проникают в зону квазизахвата.

На рис. 34 - 36 представлены сводные графики потоков протонов, электронов и тяжелых ядер солнечного происхождения в нескольких энергетических каналах детекторов спутника

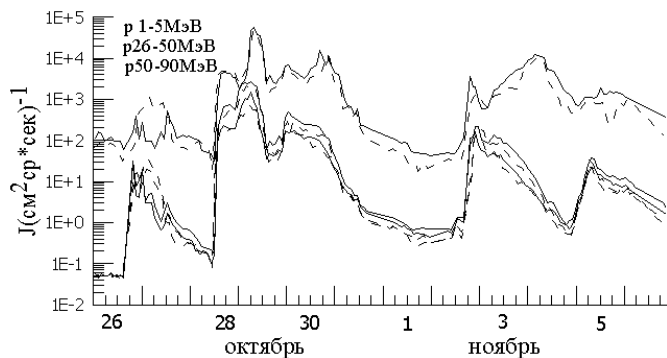


Рис 34. Поток протонов в полярной шапке 26.X - 4.XI.2003 г. по измерениям на спутнике Коронас-Ф. Пунктир - южная полярная шапка.

Коронас-Ф, в северной и южной полярных шапках. Профили интенсивности СКЛ в период 26.X – 4.XI.2003 г. определяются условиями движения в межпланетном пространстве частиц, генерированных на Солнце во время вспышек 26, 28, 29 октября, 2 и 4 ноября. Дополнительным источником вариации интенсивности, особенно в области низких энергий, является захват и ускорение СКЛ в межпланетных

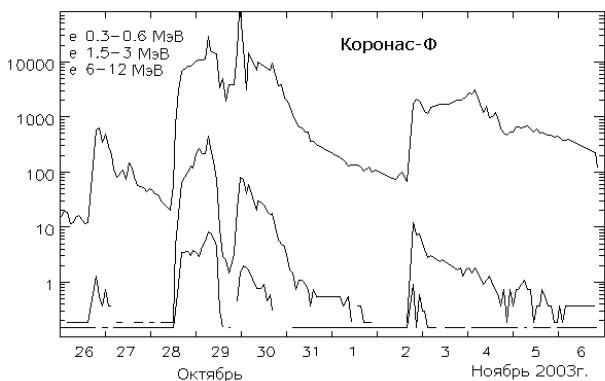


Рис 35. Поток электронов в полярной шапке 26.X - .XI.2003 г. по измерениям на спутнике Коронас-Ф.

ударных волн и другие особенности распространения в возмущенном межпланетном пространстве. Задержка спада интенсивности и подъем, связанный с МУВ, становящийся все более крутым по мере ее приближения, изменение показателей энергетического спектра связаны с приходом МУВ и частиц КВМ (СМЕ). Детально временной ход потоков СКЛ рассмотрен в статье, посвященной солнечным и гелиосферным явлениям [1].

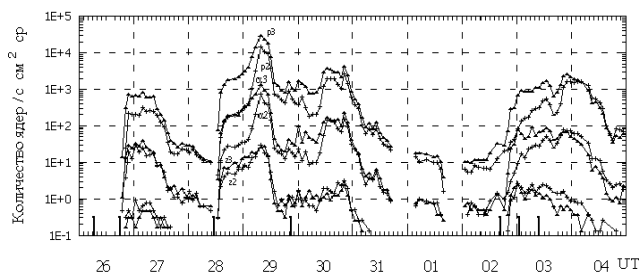


Рис. 36. Поток ядер СКЛ в южной полярной шапке в октябре-ноябре 2003 г. P2 и P3 - потоки протонов с энергиями в диапазоне 2,3 - 4,2 МэВ/н и 4,4 - 19 МэВ/н, соответственно.  $\alpha$ , A2 и A3 - ядра гелия тех же энергий. Z2 и Z3 - ядра C, N, O с энергиями 4 - 8 МэВ/н и 8 - 40 МэВ/н, соответственно.

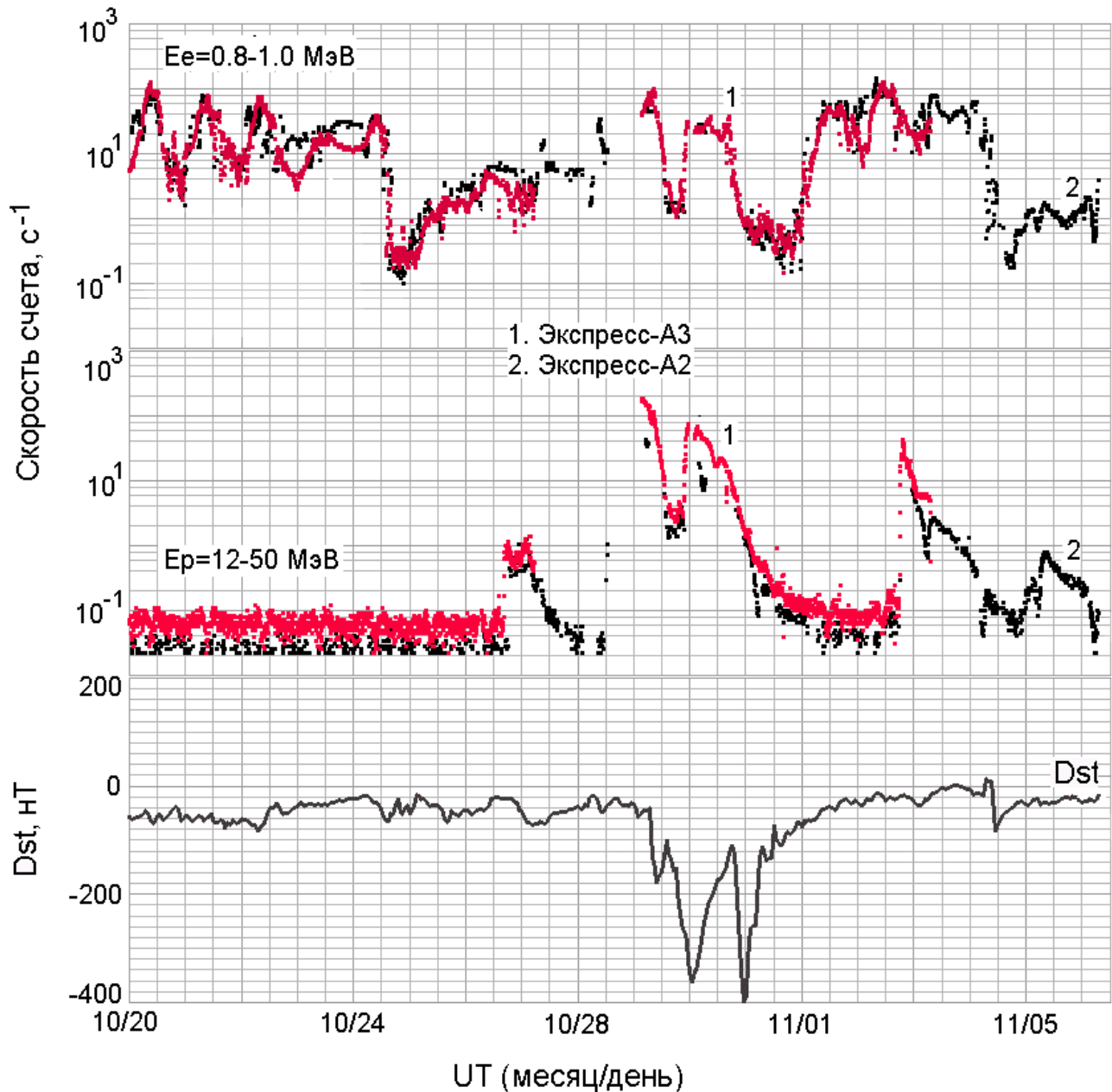
#### 4.1.2. Поток солнечных протонов на геостационарной орбите

В рассматриваемый период геостационарные спутники Экспресс-А2 и Экспресс-А3 функционировали на долготах  $80^\circ$  в.д. и  $14^\circ$  з.д., соответственно. Регистрация энергичных частиц на этих ИСЗ осуществлялась с помощью идентичных приборов ДИЭРА, разработанных в НИИЯФ МГУ для контроля радиационной обстановки на высокоапогейных спутниках навигации, связи и ТВ-вещания [38, 39]. ИСЗ Экспресс-А2 и А3 имели "жесткую" ориентацию в пространстве относительно оси "X", проходящей через центр Земли.

На рис. 37 приведены скорости счета (в импульсах в секунду) полупроводниковых детекторов с толщиной чувствительного слоя  $\sim 1$  мм Si. Регистрация электронов с энергией  $E_e = 0,8 - 1,0$  МэВ и протонов с  $E_p = 12 - 50$  МэВ осуществлялась в пределах конуса с углом раствора  $\sim 20^\circ$ , ориентированного в сторону от Земли по оси "X" спутника. Геометрический фактор для регистрации частиц таких энергий составлял  $G \sim 10^{-3}$  см<sup>2</sup> ср. Время усреднения данных в каждом цикле измерений - 6 минут.

Вне угла приемного конуса детекторы окружены пассивной защитой, через которую могли проникать электроны с энергией  $E_e \sim 10$  МэВ и протоны с  $E_p \sim 80$  МэВ. Геометрический фактор для регистрации частиц таких энергий в пределах угла  $\sim 2$  πстерадиан составлял  $G \sim 5$  см<sup>2</sup> ср.





20 октября - 6 ноября 2003 г.

Рис. 37. Регистрация заряженных частиц на геостационарных спутниках Экспресс-А2 и Экспресс-А3 в период с 20.X по 11.XI.2003 г. Верхний блок - потоки электронов с  $E_e = 0,8 - 1,0$  МэВ, средний - потоки протонов с  $E_p = 12 - 50$  МэВ.

В период с 06 UT 28.X.2003г. по 06 UT 31.X.2003 г., когда наблюдался наиболее жесткий спектр протонов СКЛ, в показания детектора могли давать вклад протоны высоких энергий за счет боковых прохождений через пассивную защиту.

Сравнение с приведенными выше измерениями на спутнике Коронас-Ф показывает, что вариации потока солнечных протонов на геостационарной

орбите практически полностью совпадают с вариациями потока в полярной шапке ( и, соответственно, в межпланетном пространстве). Этот результат говорит о том, что граница между хвостом магнитосферы и областью квазизахвата ( т.е. граница полярной шапки в проекции на ионосферу) в течении всего возмущенного периода находилась вблизи геостационарной орбиты, или ближе к Земле.

### 4.1.3. Граница проникновения солнечных электронов

На рис. 38 представлена зависимость от времени нвариантной широты границы области проникновения электронов солнечного происхождения с утренней и вечерней сторон (светлые и темные кружки, соответственно), Vz-компоненты магнитного поля по данным ИСЗ GOES-10 и Hsum (минутного аналога Dst-вариации) 29 и 30 октября.

Граница проникновения солнечных электронов отслеживает границу полярной шапки, силовых линий, уходящих в хвост магнитосферы. Ее приближение к Земле в вечерние часы 29 и 30 октября соответствует измерениям на геостационарных спутниках. Спутник LANL91, находившийся на долготе, близкой к долготе GOES-10, показал резкое уменьшение потока электронов с  $E_e \sim 135$  кэВ 29 и 30 октября в вечерние UT часы вблизи локального полудня в связи с тем, что спутник оказался вне магнитосферы.

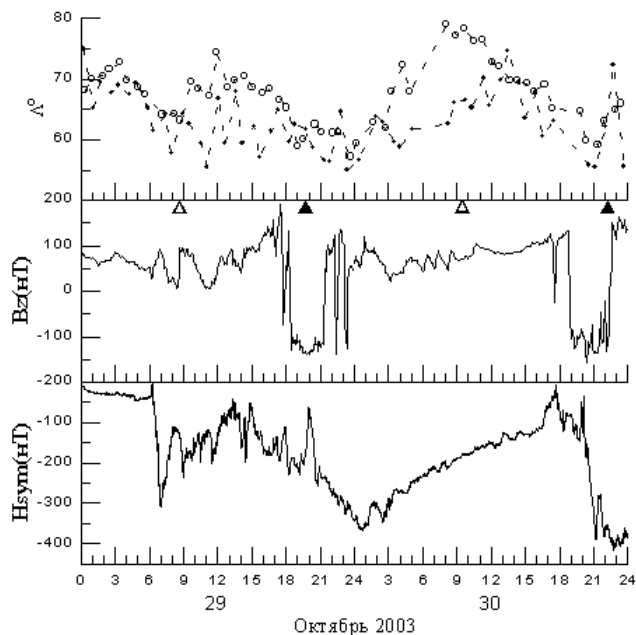


Рис. 38. Динамика границы проникновения электронов СКЛ с энергией  $E_e = 0,3 - 0,6$  МэВ по данным ИСЗ КОРОНАС-Ф (верхняя панель) в связи с вариациями магнитной компоненты Vz по данным ИСЗ GOES-10 (средняя панель) и вариациями Hsum (нижняя панель). Светлыми кружками обозначены границы в дневном (утреннем) секторе, точками - в вечернем. Треугольниками отмечено время прохождения ИСЗ КОРОНАС-Ф области захваченной радиации (рис. 44).

Спутник LANL97 в 6 UT 29 октября после SC находился вблизи местного полдня  $\sim 12$  MLT и также регистрировал резкое уменьшение потока электронов с  $E_e \sim 135$  кэВ, но, по-видимому, спутник не вышел за пределы магнитосферы. Как видно из рис. 38, граница проникновения солнечных электронов на утренней стороне в конце главных фаз магнитных бурь 29 и 30 октября смещалась до  $\sim 58^\circ$ . Ранее самое сильное смещение к экватору дневной границы проникновения солнечных электронов ( $\sim 61^\circ$ ) было зарегистрировано на ИСЗ Космос-900 во время магнитной бури с амплитудой Dst  $\sim 200$  нТл [32].

### 4.1.4. Граница проникновения солнечных протонов

В отличие от электронов, солнечные протоны заполняют не только хвост магнитосферы, но и проникают в область квазизахвата. С развитием главной фазы бури граница проникновения смещается к Земле. В предшествующих работах НИИЯФ МГУ эта проблема исследовалась подробно [30-35, 40-41]. В частности, было показано, что величина смещения коррелирует с индексами магнитной активности Dst и AE. Совместное влияние кольцевого тока и авроральной активности исследовалось в работе [35], и для протонов с энергией  $E_p > 1$  МэВ была найдена лучшая корреляция положения границы проникновения с параметром AD, представляющий собой комбинацию AE и Dst:

$$AD = (Dst^2 + 0.02 \cdot AE^2)^{1/2}.$$

Помимо индексов, отражающих развитие процессов внутри магнитосферы, исследовалась связь с давлением солнечного ветра, которое учитывается по расстоянию до подсолнечной точки магнитосферы, определяемому по формуле:

$$X_0 = \frac{8.51}{P^{0.19}} + \frac{3.45}{P^{0.22}} \exp\left(-\frac{(|B_z| - B_z)^2}{200P^{0.15}}\right),$$

где давление плазмы солнечного ветра P измеряется в нПа, а магнитное поле - в нТл [40].

Статистический анализ нескольких событий показал, что граница проникновения солнечных электронов контролируется суббуревым индексом авроральной активности AE и в меньшей степени -

Хо. Для солнечных протонов значимыми в равной степени являются Хо и AD -индексы [41].

Серия магнитных бурь 29 - 30 октября, вызванная корональными выбросами массы во время солнечных вспышек 28 и 29 октября, является рекордной и по величине Dst (до -400 нТл), и по глубине проникновения солнечных энергичных частиц, и по уменьшению области, в которой может существовать захваченная радиация (радиационные пояса). В поздние вечерние часы (по мировому времени) 29 и 30 октября на главной фазе магнитных бурь магнитопауза по данным ИСЗ GOES-10 (LT = UT - 9 час. для GOES-10) находилась на  $R < 6,6 R_e$  (см. рис 5).

С приближением к Земле поток солнечных протонов спадает не мгновенно, поэтому можно определить внешнюю границу там, где поток начинает уменьшаться (для определенности было принято расстояние, на котором поток спадал в два раза) и фоновую границу, где поток протонов падает на два порядка по сравнению с потоком в полярной шапке. Для определения динамики границы в нашем распоряжении были данные измерений нескольких детекторов двух спутников, пролеты как через южную, так и северную шапки. Для анализа использовались лишь данные спутника Метеор-3М канал с энергией  $E_p > 90$  МэВ, и ИСЗ Коронас-Ф – каналы регистрации солнечных протонов с  $E_p = 1 - 5$  и  $50 - 90$  МэВ.

**Метеор-3М. Орбита и аппаратура.** Спутник Метеор-3М запущен 10.XII.2001 г. на приполярную круговую солнечно-синхронную орбиту с высотой ~1000 км, наклоном 99,6° и периодом обращения 105 минут. Бортовая аппаратура для наблюдений вариаций потоков заряженных частиц включает Комплекс геофизических измерений КГИ-4С (ИПГ) и многоканальный спектрометр геоактивных излучений МСГИ-5ЕИ (НИИЯФ МГУ и НЦ ОМЗ).

В аппаратуре КГИ-4С в качестве детекторов используются 8 счетчиков частиц: два сцинтилляционных, черенковский и пять гейгеровских. Конструктивные и электрические параметры сцинтилляционных счетчиков обеспечивают регистрацию потоков протонов с пороговыми энергиями 90 МэВ (БП) и 30 МэВ (МП) с подавлением сигналов от электронов. Черенковский счетчик регистрирует потоки протонов с энергией более 600 МэВ и электронов с энергиями выше 8 МэВ. Гейгеровские детекторы с

различными экранами измеряют суммарные потоки протонов и электронов. Толщины экранов подобраны из расчета, чтобы обеспечить разные пороговые энергии для протонов в пределах 5 - 40 МэВ и для электронов, соответственно, - в диапазоне 0,15 - 3 МэВ. К этим данным примыкают измерения гейгеровским детектором в составе аппаратуры МСГИ-5ЕИ с пороговыми энергиями 1 МэВ по протонам и 40 кэВ по электронам.

Спектрометр МСГИ-5ЕИ предназначен для измерения дифференциальных спектров как электронной, так и ионной (протонной) компонент геоактивных корпускулярных излучений. Детектирование низкоэнергичных частиц, разделение их по заряду и энергии осуществляется двумя видами спектрометрических модулей, состоящих из цилиндрических электростатических анализаторов, вторичных электронных умножителей типа ВЭУ-6 (низкочувствительный модуль) или ВЭУ-7 (высокочувствительный модуль), зарядочувствительных усилителей и формирователей нормализованных импульсов. Указанные спектрометрические модули обеспечивают измерения дифференциальных энергетических спектров низкоэнергичных ионов (протонов) и электронов в диапазоне энергий 0,1 - 15 кэВ. Измерения энергетических спектров электронов и ионов (протонов) могут производиться в двух режимах:

- (1) режим изучения пространственно-временных вариаций в периоды гелиогеомагнитных возмущений (режим 1), при этом полное время измерения энергетического спектра составляет 2 с, число энергетических интервалов 10;
  - (2) режим диагностики (режим 2), при этом полное время измерения энергетического спектра равно 10 с, число энергетических интервалов составляет 50.
- Режимы работы определяются конкретными условиями проведения измерений и задаются внешними командами.

**Метеор-3М. Измерения.** На рис. 39 представлены вариации инвариантной широты границы проникновения солнечных протонов  $L_b$ , измеренных на ИСЗ Метеор-3М в вечерне-полуночном секторе магнитосферы в конце октября 2003 г. Положение границ определялось по моменту спада интенсивности высокоэнергичных протонов с  $E_p > 90$  МэВ в 2 раза по отношению к среднему значению на полярном плато.

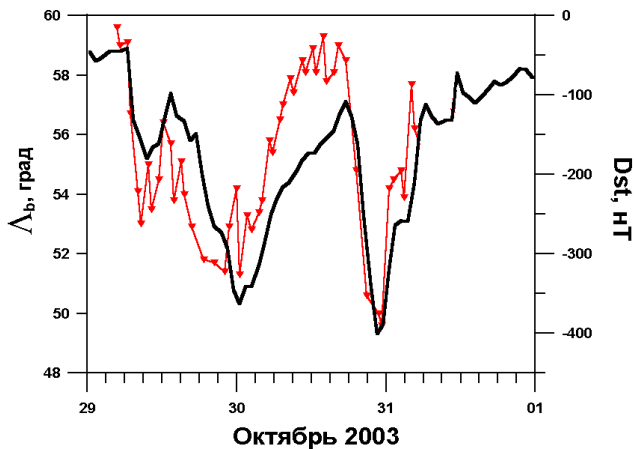


Рис. 39. Вариации положения границ проникновения солнечных протонов с энергией  $E_p > 90$  МэВ в вечерне-полуночном секторе магнитосферы (темные треугольники) во время серии сильных магнитных бурь 29 - 31 октября 2003 г. Сплошная жирная кривая - Dst-вариация.

Видно, что самое низкоширотное положение границ хорошо соответствует моментам максимума амплитуды Dst-вариации во время супербурь 29 и 30 октября. Минимальная инвариантная широта границы ( $\Lambda_B \sim 49^\circ$ ) достигнута в максимуме супербури 30 октября. Границы хорошо следуют за ходом Dst на главной фазе этой бури. Однако во время первой и второй бурь ход границ значительно отличается от хода Dst. Ясно, что положение границ СКЛ более сложным образом зависит от параметров солнечного ветра и суббуревой активности.

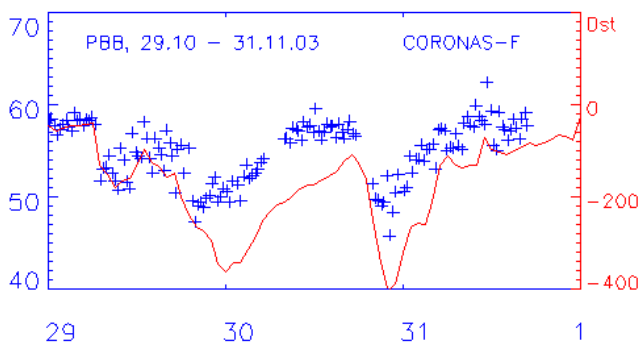


Рис. 40. Движение фоновой границы проникновения солнечных протонов  $E_p = 60 - 90$  МэВ 29 - 30.X.2003г. по данным ИСЗ КОРОНАС-Ф.

**Коронас-Ф.** На рис. 40 приведены графики движения фоновой границы протонов с энергией 60 МэВ 29 и 30.X.2003 г. вместе с графиком Dst. Располагается эта граница как и следовало ожидать,

ближе к экватору, чем внешняя граница, показанная на рис. 39, и достигает вечером 30 октября широты  $45^\circ$ , т.е.  $L = 2$ .

В целом видно и здесь видно хорошее совпадение движения границ с Dst, отмеченное выше по данным спутника Метеор. Хорошая корреляция обеспечивается на фазе восстановления бури с откатом границы проникновения к полюсам. Вместе с тем на главной фазе картина более сложная. Сдвиг границ в начале первой бури происходит быстро, почти скачком. Во время главной фазы второй бури также сдвиг границы быстрый, существенно быстрее, чем спад Dst.

Для объяснения быстрых скачков границы проникновения, выявленных независимо по данным двух спутников можно предположить вклад процессов, имеющих другой характерный временной масштаб и связанных с суббуревой активизацией, а именно, с быстрой перестройкой магнитосферной конфигурации. Действительно, как было показано в предыдущей главе, необычная сильная суббуря была триггирована внезапным началом в 06.12 UT 29 октября. Второй быстрый сдвиг границы в 19 - 20 UT также совпал с сильной суббурей в полуночном секторе.

Вместе с тем нельзя не учитывать роль прямого воздействия солнечного ветра на структуру магнитосферы: рассматриваемые моменты совпадают с поджатием головной части магнитосферы и с резким усилением крупномасштабного электрического поля (см. рис. 6).

#### 4.1.5. Движение границы проникновения до начала бури.

Солнечные космические лучи в полярных шапках присутствуют с 26 октября, что дает возможность проследить движение границ их проникновения до начала магнитных бурь 29 - 30 октября и вплоть до фазы затухания.

На рис. 41 приведен временной ход широты фоновой границы проникновения протонов с энергией 1 - 5 МэВ 26-28 октября. Из рисунка видно, что существенные вариации положения границы проникновения наблюдаются не только во время магнитных бурь. В первой половине 26.X.2003 г. граница движется к полюсам до  $\lambda = 68^\circ$ , затем вечером 26-го и ранним утром 27.X вновь уходит к экватору до  $56^\circ$  инвариантной широты.

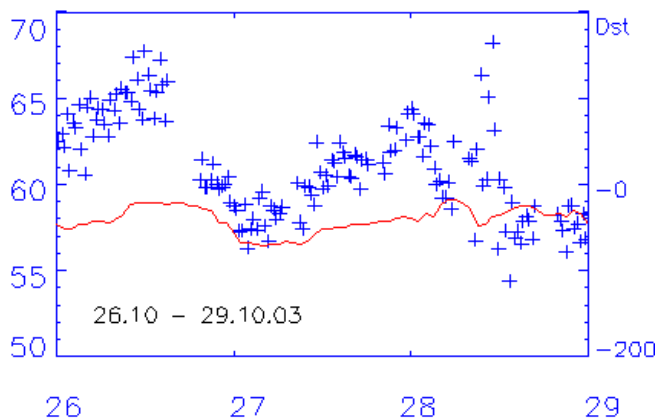


Рис. 41. Движение фоновой границы проникновения солнечных протонов  $E_p = 1-5$  МэВ в сравнении с  $Dst$  в период 26 - 28.X.2003 г. до начала магнитных бурь по измерениям на ИСЗ КОРОНАС-Ф.

Почти весь день 27-го и до 02 UT 28.X граница движется к полюсам, а затем - снова к экватору, что сопровождается сильными вариациями этой широты.

Можно с большой долей уверенности положить, что приближение границы к Земле во второй половине 26.X 2003 г. связано с повышенной суббуревой активностью, тогда как удаление границы от Земли вызвано спадом этой активности.

На рис. 42 приведены магнитограммы обсерватории Lovozero, 26-27.10.2003

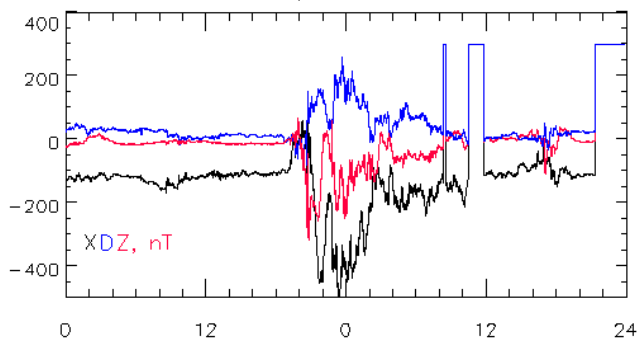


Рис. 42. Магнитограмма обс. Ловозеро 26 - 27.X.2003 г.

Ловозеро, анализ которых подтверждает это предположение. Вместе с тем для равного по глубине следующего сдвига границы 28.X.2003 г. не удастся найти аналогичной цепочки суббурь. Магнитная обстановка остается спокойной всю первую половину суток, когда наблюдался сдвиг границ. Разгадка, вероятно, кроется в поведении солнечного ветра. По данным КА Wind и Geotail с 02 UT до 04 - 06 UT плотность солнечного ветра растет в десять раз, с 1 до 10 частиц/см<sup>3</sup>. Происходит заметный рост скорости от 480 до 600

км/с. Кроме того, около 09 UT наблюдается разрыв, скачок плотности и температуры, связанный с прохождением фронта ударной волны. Именно этим можно объяснить наблюдавшийся в эти часы разброс в положении границ проникновения СКЛ при дневных и ночных пролетах.

Таким образом, обнаружено, что граница проникновения СКЛ все время «дышит», движется к Земле и обратно с амплитудой более чем на 10 градусов инвариантной широты (от 68° до 58° в нашем случае) и в отсутствие магнитных бурь.

## 4.2 ДИНАМИКА РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ.

Изменения во время магнитных бурь радиационных поясов, как основного источника радиационной опасности в околоземном пространстве, уже длительное время привлекает к себе внимание исследователей [42 - 45]. Изменения эти велики и не укладываются в какую-либо простую схему. Быстрые потери частиц и даже полное исчезновение внешнего пояса сменяется образованием нового пояса, иногда двух и трех, радиальным смещением к Земле, ускорением частиц. Характер динамики радиационных поясов во время бурь зависит от энергии частиц, их заряда и ядерного состава. Изменения на главной фазе бури происходят на временных интервалах меньше периода оборота спутника, поэтому проследить подробно за процессом не удастся. Более того, корректно сравнивать измерения на данном пролете с измерением в том же районе и в то же местное время; в результате удастся установить достоверно лишь суммарные изменения за сутки. Учитывая сказанное, не вызывает удивления тот факт, что в динамике радиационных поясов во время мировых бурь остается до сих пор много неясного.

Кроме того, очевидно, что сколько-нибудь подробный анализ для данного конкретного события требует специального исследования, и в рамках общей работы мы можем лишь привести несколько результатов, выделяющих данную серию супербурь.

### 4.2.1. Динамика внешнего пояса электронов. ИСЗ МЕТЕОР-3М

В настоящем сообщении представлены предварительные результаты исследования динамики радиационных поясов релятивистских электронов с энергиями  $E_e$  свыше 8 МэВ.

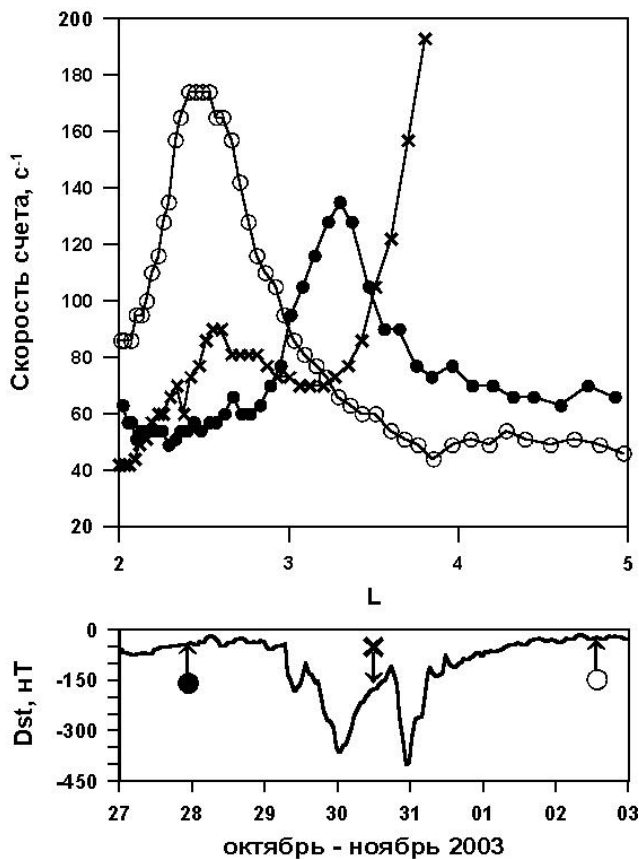


Рис. 43. Профили радиационного пояса электронов с  $E_e > 8$  МэВ, наблюдавшиеся 28.X - 02.XI.2003 г. Моменты пролетов ИСЗ Метеор-3М через радиационный пояс указаны стрелками на графике Dst-вариации. Измерения электронов таких энергий малочисленны и поэтому наиболее интересны.

Изменение со временем профиля потоков электронов с энергиями более 8 МэВ, регистрировавшихся черенковским детектором при разных пролетах через внешний пояс, показано на рис. 43. Моменты пролетов спутника указаны на графике Dst-вариации в нижней части рисунка. 27.X.2003 г. максимум внешнего радиационного пояса наблюдался на  $L \sim 3,3$ . На фазе восстановления первой супербури он сместился на  $L \sim 2,6$ ; возрастание скорости счета в области  $L > 3$  на этом пролете связано с тем, что здесь черенковский счетчик регистрировал солнечные протоны с энергией больше 600 МэВ. К концу фазы восстановления второй супербури (02.XI.2003 г.) произошло небольшое дополнительное смещение пояса к Земле ( $L_{\max} \sim 2,5$ ), а интенсивность возросла (пролеты подбирались по близким значениям напряженности магнитного поля В). Таким образом, в результате нескольких сильных магнитных бурь максимум внешнего радиационного

пояса релятивистских электронов с  $E_e > 8$  МэВ сместился на L-оболочки внутреннего пояса. Аналогичный эффект мы наблюдали по данным ИСЗ Метеор во время бури 24 - 25 марта 1991 г. [46]. Максимум сформировавшегося в результате "ударной" инжекции во время мощного внезапного начала бури пояса электронов с  $E_e > 8$  МэВ в течение последовавшей затем супербури ( $|Dst|_{\max} \sim 300$  нТл) сместился с  $L \sim 2,8$  на  $L \sim 2,3$ . На фазе восстановления этой бури появился "новый" пояс электронов меньших энергий (0,7 - 3 МэВ) с максимумом на  $L \sim 3$ . Это значение  $L_{\max}$  хорошо соответствует зависимости положения максимума пояса инжектированных во время магнитных бурь релятивистских электронов от амплитуды Dst-вариации [47].

На фазе восстановления супербури 31 октября 2003 г. также появился новый пояс электронов с  $E_e > 0,7$  МэВ с максимумом на  $L \sim 2,9$ , а в конце фазы восстановления, 1 - 2 ноября, на профиле внешнего пояса возник еще один дополнительный максимум на  $L \sim 4,5$  (для всех энергий электронов).

#### 4.2.2. Динамика радиационных поясов. ИСЗ Коронас-Ф

Данные о потоках частиц в полярных шапках и в радиационных поясах получены с помощью ИСЗ КОРОНАС-Ф. Спутник имел высоту около 500 км,

поэтому мы могли регистрировать захваченную радиацию лишь в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии. На рис. 38 время регистрации захваченных электронов в утренние часы ( $\sim 9$  MLT) отмечено светлыми, а в вечерние часы ( $\sim 21$  MLT) - темными треугольниками.

Чтобы получить информацию о внешнем и внутреннем поясах, необходимо сравнение данных двух-трех прохождений через область аномалии. Данные о радиационных поясах 28 октября могут служить характеристикой пояса перед магнитными бурями. На рис. 44 в левой половине представлены данные о структуре потоков электронов с энергиями 0,3 - 0,6 и 1,5 - 3 МэВ с утренней стороны, справа - о структуре потоков протонов с энергиями 1 - 5 и 14 - 26 МэВ. Правая половина рисунка имеет аналогичную структуру для анализа потоков частиц, зарегистрированных с вечерней стороны Земли. С утренней стороны, исключая 29 октября, данные получены в относительно спокойное время. Таким образом, 30 и 31.X.2003 г. мы видим результаты воздействия бурь 29 и 30.X.2003 г. 29 октября

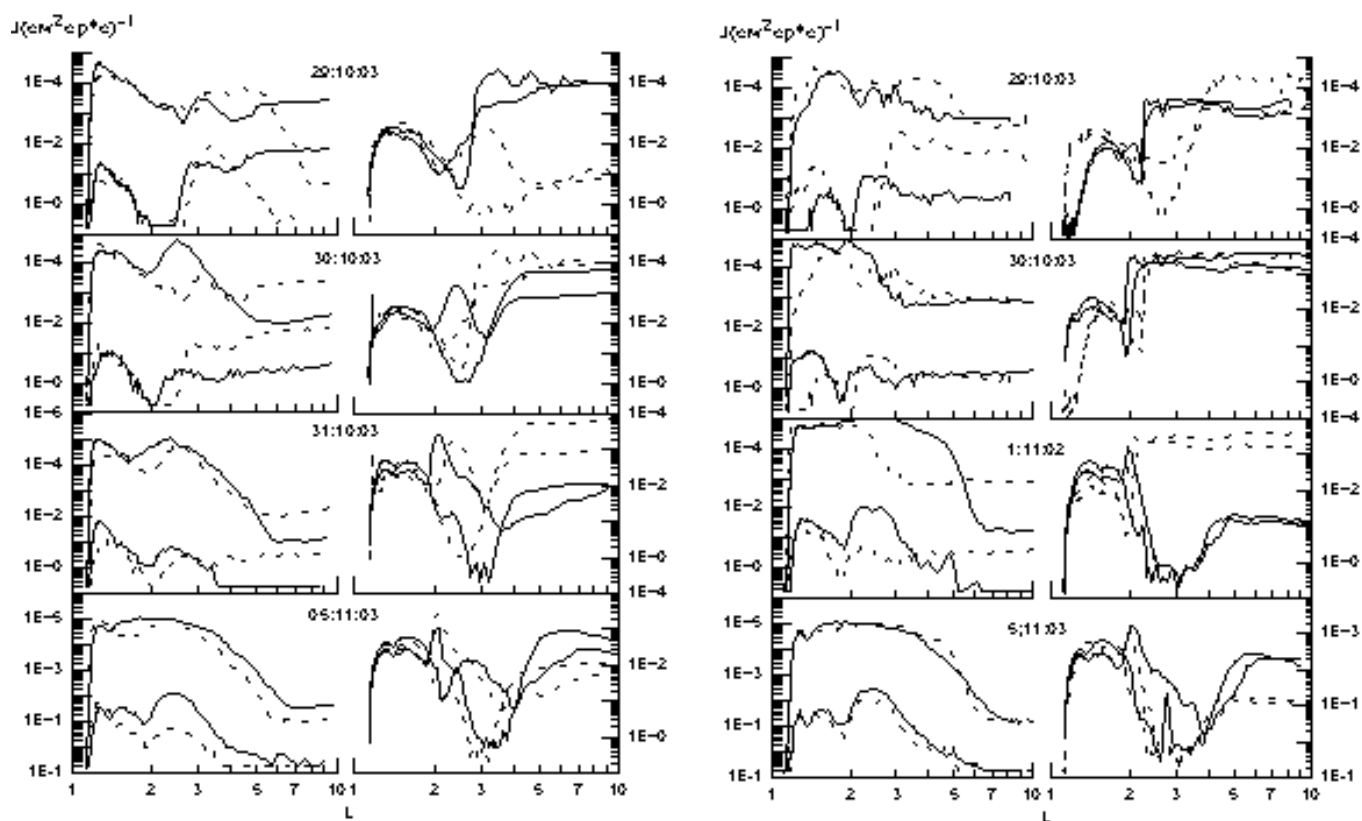


Рис. 44. Сравнение профилей потоков частиц радиационных поясов, измеренных на ИСЗ КОРОНАС-Ф с 28.X по 5.XI.2003 г. В левой части приведены данные, полученные в 7 - 9 UT, в правой - в 19 - 23 UT. В левой части каждого рисунка приведены данные о потоках электронов с энергией  $E_e = 0,3 - 0,6$  МэВ (тонкая линия) и с  $E_e = 1,5 - 3$  МэВ. (толстая линия), в правой части о потоках протонов соответственно с энергией  $E_p = 1 - 5$  МэВ и  $14 - 26$  МэВ. Для сравнения штриховыми линиями показаны данные, относящиеся к предыдущей панели. На самой верхней панели штриховыми линиями показаны данные, относящиеся к 28 октября.

данные о внешнем поясе получены в  $\sim 8.39$  UT при  $Dst = -150$  нТл ( $H_{sym} = -120$  нТл). Мы видим, что размер внешнего пояса сильно уменьшился. При предыдущем прохождении внешнего пояса (в  $\sim 07.03$  UT) пояс практически не изменился по сравнению с 28 октября (смотри рис. 45), хотя  $H_{sym} = -300$  нТл.

Пояс протонов с энергией 1 - 5 МэВ в октябре 2003 г. имел дополнительный максимум на  $L \sim 3$ . В 8.39 UT 29 октября граница проникновения протонов солнечного происхождения находилась на  $L \sim 3$ . В вечерние часы 29 и 30 октября пояс регистрировался на главной фазе магнитных бурь.

29 октября формирование пояса электронов еще не было закончено. На  $L > 3$  поток электронов с энергией 0,3 - 0,6 МэВ существенно меньше, чем до магнитной бури. На  $L < 2,7$  поток захваченных электронов с энергией 1,5 - 3 МэВ больше, чем до бури. Максимум главной фазы зарегистрирован в первом часу 30 октября, и возрастание потоков электронов надо ожидать после 1 UT 30 октября.

В 9.28 UT 30 октября внешний пояс был зарегистрирован с максимумом на  $L \sim 2,5$ . Здесь же сформировался и пояс протонов с энергией 1 - 5 МэВ. 30 октября в 22.10 UT вблизи максимума главной фазы максимум внешнего пояса сместился на  $L \sim 2$ , его граница была зарегистрирована на  $L \sim 3$ .

Граница области проникновения солнечных протонов с энергией 1 - 5 МэВ была зарегистрирована на  $L \sim 2$ .

31 октября в 8.43 UT внешний радиационный пояс имел границу на  $L \sim 6$ , а максимум пояса электронов находился на  $L \sim 2,2$ .

Мы также зарегистрировали возрастание потоков протонов с энергией 1 - 5 и 14-26 МэВ на  $L \sim 2 - 2,2$ . 31 октября в 22 - 23 UT мы не имели данных, поэтому привели вечерние данные за 1 ноября. Видно расширение внешнего пояса электронов, значительное увеличение потоков электронов с энергией 1,5 - 3 МэВ.

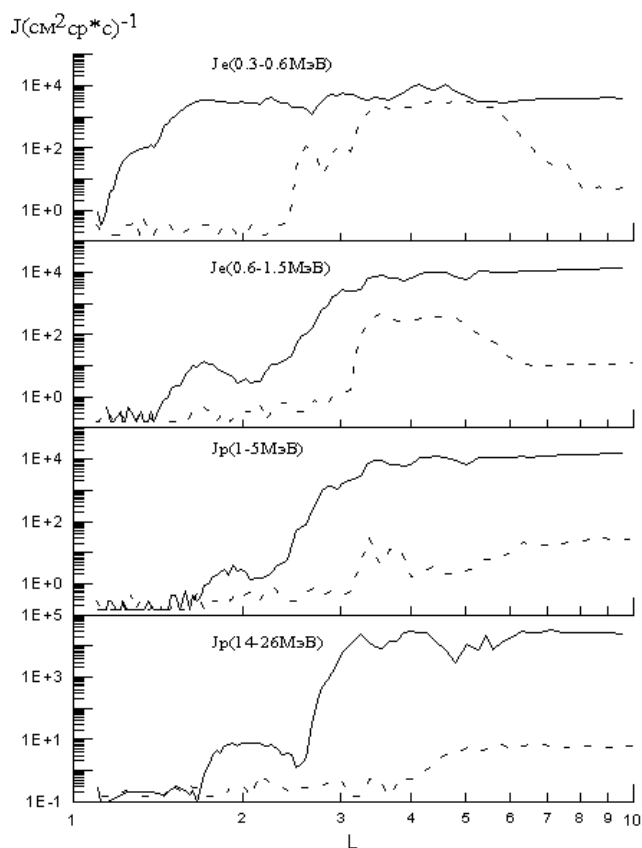


Рис. 45. Сравнение структуры внешнего пояса 29.X.2003 г. в  $\sim 7.03$  UT (сплошные линии) и 28.X в  $\sim 4.43$  UT (пунктир). Сверху вниз: потоки электронов с  $E_e = 0,3 - 0,6$  МэВ (а) и  $E_e = 0,6 - 1,5$  МэВ (б), а также потоки протонов с  $E_p = 1 - 5$  МэВ (в) и  $14 - 26$  МэВ (г), измеренные на ИСЗ КОРОНАС-Ф.

Пики интенсивности протонов с энергией 1 - 5 и 14 - 26 МэВ сохранились. Структура поясов в период с 1 по 5 ноября 2003 г. изменилась мало. Максимум потоков электронов регистрировался на  $L \sim 2,5$ . Продолжали наблюдаться пики протонов с  $E_p = 1 - 5$  и  $14 - 26$  МэВ. Пик протонов с энергией 14 - 26 МэВ наблюдался на  $L \sim 2,7 - 2,9$ , а протонов с энергией 1 - 5 МэВ на  $L \sim 2$ .

Из приведенных данных видно, что во время главных фаз магнитных бурь граница области проникновения солнечных электронов смещалась до инвариантной широты  $50^\circ$  ( $L = 2,5$ ) с вечерней стороны и до  $55^\circ$  ( $L = 3,1$ ) с утренней стороны. Этим можно объяснить формирование внешнего пояса на  $L \sim 2,5$ .

Протоны солнечных космических лучей в главные фазы магнитных бурь проникали до  $L = 2$ . На  $L > 2$  возникают дополнительные пояса протонов с энергиями  $E_p = 1 - 5$  и  $14 - 26$  МэВ. Для протонов с энергией 26 - 50 МэВ и более такой эффект не наблюдался.

### 4.2.3. Рост потока электронов после бури. ИСЗ Экспресс А-2 и А-3.

В показаниях электронного канала спутников Экспресс (рис. 37, верхняя панель) хорошо видна суточная вариация потоков на геосинхронной орбите. Обращают на себя внимание резкие спады интенсивности электронов с  $E_e = 0,8 - 1,0$  МэВ, имевшие место 24.X и 04.XI.2003 г. Эти вариации связаны с усилением геомагнитных возмущений во время слабых магнитных бурь (см. Dst-вариацию, нижняя панель). После спада интенсивности электронов 24.X.2003 г. в течение примерно трёх суток шло ее возрастание. Однако в начале солнечных протонных событий уровень интенсивности электронов все еще был на порядок ниже предбуревых. Во время мощного возрастания энергичных солнечных протонов 28 - 30.X.2003 г. счет детектора был обусловлен протонами с энергиями в десятки МэВ.

01.XI.2003 г. началась рост интенсивности электронов, которая за  $\sim 10$  часов достигла уровня, на порядок превышающего предбуревую. Таким образом, появившиеся на геосинхронной орбите электроны ускорились на фазе восстановления последней супербури, максимум амплитуды Dst-вариации которой ( $\sim 400$  нТл) зарегистрирован в 23 UT 30.X. Важную роль при этом могло играть ускорение электронов суббуревыми импульсами [48].

### 4.3. Радиационная обстановка на Международной космической станции

Во время событий конца октября – начала ноября 2003 года на российском служебном модуле МКС функционировала система радиационного контроля (СРК), предназначенная для определения уровня радиационного воздействия. Чувствительные элементы системы размещены в блоках ДБ-8 и в дозиметре Р-16. Все 4 блока ДБ-8 идентичны на экипаж МКС.

В каждом из них находилось 2 полностью независимых канала, состоящих из кремниевого полупроводникового детектора толщиной 300 мкм и площадью  $1 \text{ см}^2$ , и последующей схемы обработки сигнала. При этом один из двух детекторов, входящих в состав каждого блока ДБ-8, защищен слоем свинца толщиной 2,5 мм. Чувствительными элементами дозиметра Р-16 являются 2 ионизационные камеры, одна из которых имеет



дополнительную защиту из оргстекла толщиной 3 см.

Существенное значение при организации радиационного контроля имело размещение блоков ДБ-8 на борту станции внутри гермоотсека. Точки размещения выбирались таким образом, чтобы обеспечить различные условия экранированности детекторов СРК оборудованием станции. Это необходимо для того, чтобы при анализе результатов определять кривую ослабления дозы и использовать ее для расчета поглощенной дозы в любом месте российского модуля МКС.

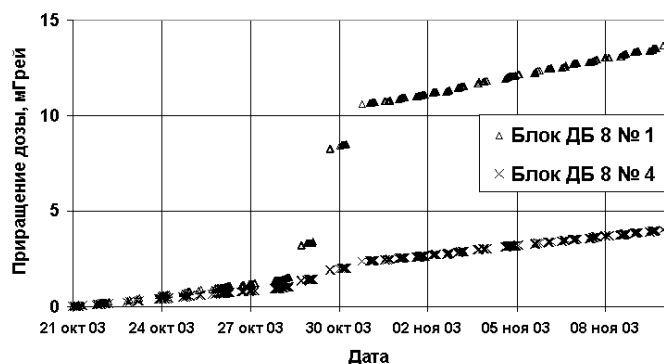


Рис. 46. Динамика накопления дозы по данным незранированных детекторов блоков ДБ-8 № 1 и № 4.

На рис. 46 представлены данные о динамике накопления дозы по данным незранированных детекторов наименее защищенного блока ДБ-8 № 1 и наиболее защищенного блока ДБ-8 № 4. В качестве начального уровня были использованы показания детекторов на 0 часов 21 октября 2003 года. Здесь и далее используется мировое время. Как и следовало ожидать, хорошо видно, что во время рассматриваемых солнечных протонных событий наблюдался значительный перепад дозы в отсеках станции. Наблюдались три периода значительного увеличения темпа накопления дозы на борту.

Первый период начался 28 октября в 15.25 UT после появления высокоэнергичных протонов СКЛ в околоземном пространстве. В это время траектория полета МКС проходила через зону проникновения высокоэнергичных заряженных частиц, расположенную над южной частью Индийского океана. К 19 UT 28 октября траектория МКС перестала проходить через высокоширотные зоны проникновения высокоэнергичных заряженных частиц. Поэтому темп накопления дозы на борту стал соответствовать обычному уровню до 8 UT 29 октября, несмотря на то, что именно в этот период наблюдался максимум потока протонов.

Второй период начался в 8.15 UT 29 октября после того, как траектория полета МКС вновь начала проходить через зоны проникновения высокоэнергичных заряженных частиц. Закончился второй период в 12.15 UT 29 октября после прохождения зоны над севером Канады вследствие уменьшения потоков протонов СКЛ.

Третий период обусловлен новой солнечной вспышкой, которая произошла 29 октября в 20.40 UT. Однако увеличение темпа накопления дозы на борту наблюдалось в период с 07 до 13 UT 30 октября, что обусловлено очередным прохождением МКС через зоны проникновения высокоэнергичных заряженных частиц.

Для первого периода характерен жесткий спектр протонов, падающих на магнитосферу Земли, и низкий уровень геомагнитной возмущенности.

Второй, наибольший по накопленной дозе период характеризуется более мягким спектром протонов и

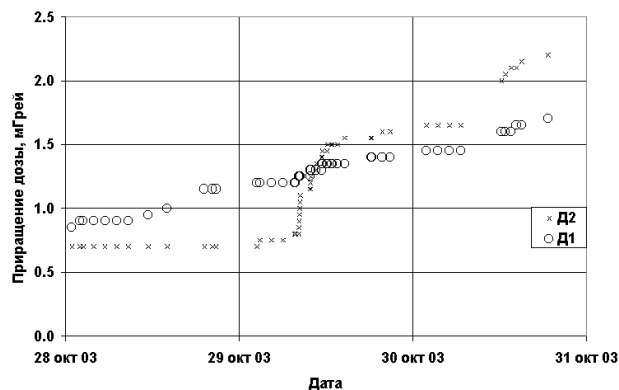


Рис. 47. Динамика накопления дозы по данным дозиметра P-16.

умеренным уровнем геомагнитной возмущенности. Третий период проходил на фоне сильнейшей геомагнитной бури. Поэтому, несмотря на то, что потоки протонов были заметно меньше, чем во время предыдущего возрастания СКЛ, значения поглощенных доз на борту станции оказались лишь немного меньше.

На рис. 47 представлены аналогичные результаты, полученные по данным прибора P-16. К сожалению, 25 октября перестал нормально функционировать канал Д2 прибора P-16. Ионизационная камера этого канала не имеет дополнительной защиты из оргстекла и поэтому оказывается более чувствительной к изменениям радиационной обстановки. Восстановить функционирование канала Д2 удалось только после 20 UT 28 октября, поэтому первая часть возрастания в показаниях данного канала оказалась пропущенной (горизонтальный участок на рис. 47). Тем не менее

наличие данных по остальным детекторам позволило уверенно контролировать радиационную обстановку на борту МКС в течение всего возмущенного периода.

Заметного влияния других солнечных протонных событий конца октября – начала ноября 2003 года на радиационную обстановку на борту МКС обнаружено не было. Можно отметить небольшое увеличение среднесуточной мощности дозы после 30 октября.

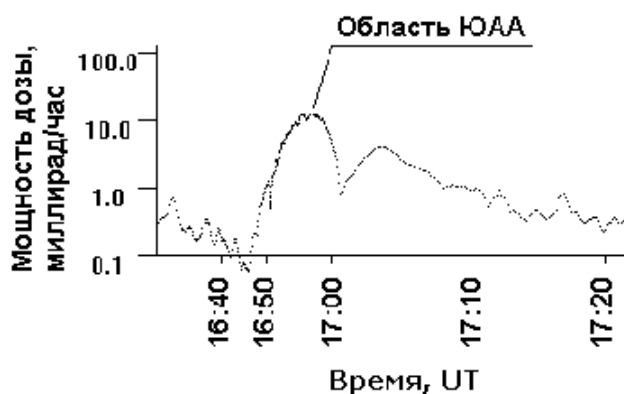


Рис. 48. Мощность дозы, зарегистрированная 31 октября 2003 г. незащищенным детектором блока ДБ-8 №1 на нисходящем участке траектории. Шкала времени неравномерная

На рис. 48 представлен график мощности дозы, зарегистрированной 31 октября 2003 г. незащищенным детектором блока ДБ-8 №1 на нисходящем участке траектории, проходящем через зону Южно-Атлантической аномалии (ЮАА). Хорошо видно наличие второго максимума мощности дозы после прохождения зоны Южно-Атлантической аномалии. Это иллюстрирует влияние нестационарных процессов в радиационных поясах Земли на радиационную обстановку на борту МКС.

Отметим, что значения поглощенных доз на борту МКС, обусловленные солнечными протонными событиями октября 2003 года, оказались существенно меньше значений доз, зарегистрированных на станции «МИР» в октябре 1989 года, несмотря на то, что значения потоков протонов были одного порядка. Уникальное возрастание дозы на станции "Мир" 20 октября было обусловлено совпадением по времени пика интенсивности солнечных протонов с понижением широты их геомагнитного обрезания во время сильных геомагнитных возмущений, которое значительно увеличило

время пребывания станции на широтах полярного плато солнечных протонов [49,50]

Подробный анализ причин этого различия двух супербурь проведен в работе[51]. Представим здесь основные результаты этой работы.

В таблице 2 представлены интегральные характеристики солнечных протонных событий (СПС) в октябре 1989 г. и в октябре 2003 г. Из таблицы видно, что по величинам потоков протонов рассматриваемые СПС действительно сопоставимы.

Таблица 2.

Интегральные характеристики СПС в октябрьях 1989 и 2003 гг.

Дата начала СПС	Характеристики
19.10.89	$J(>30 \text{ МэВ}) = 2,25 \cdot 10^9$ $R_o = 103,6 \text{ МВ}$ $\gamma = 1,59$ $D_{st} = -127,4 \text{ нТл}$
22.10.89	$J(>30 \text{ МэВ}) = 9,77 \cdot 10^8$ $R_o = 109,6 \text{ МВ}$ $\gamma = 1,72$ $D_{st} = -74,7 \text{ нТл}$
24.10.89	$J(>30 \text{ МэВ}) = 5,14 \cdot 10^8$ $R_o = 133,5 \text{ МВ}$ $\gamma = 1,28$ $D_{st} = -40,0 \text{ нТл}$
24.10.89	$J(>30 \text{ МэВ}) = 5,14 \cdot 10^8$ $R_o = 133,5 \text{ МВ}$ $\gamma = 1,28$ $D_{st} = -40,0 \text{ нТл}$
26.10.03	$J(>30 \text{ МэВ}) = 1,92 \cdot 10^7$ $R_o = 47,6 \text{ МВ}$ $\gamma = 3,42$ $D_{st} = 8,6 \text{ нТл}$
28.10.03	$J(>30 \text{ МэВ}) = 2,52 \cdot 10^9$ $R_o = 64,9 \text{ МВ}$ $\gamma = 2,79$ $D_{st} = -28,2 \text{ нТл}$

здесь:  $J(>30 \text{ МэВ})$  – поток протонов с энергией выше 30 МэВ за все событие (30 МэВ используется как энергия протонов, поглощаемых толщиной защиты 1 г/см<sup>2</sup>);

$R_o$  – характеристическая жесткость спектра протонов СПС при экспоненциальном представлении;

$\gamma$  - показатель спектра протонов СПС при степенном представлении;

$D_{st}$  – среднее значения амплитуды кольцевого тока за время СПС.

Но условия проникновения протонов на орбиту пилотируемой станции (орбитальный комплекс МИР в 1989 г. и МКС в 2003 г.) совершенно различные. Для дальнейшего анализа была использована разработанная в ИМБП РАН программа расчета доз радиации на борту станций МИР и МКС в зависимости от положения станции на орбите и интенсивности основных источников радиации - галактических и солнечных космических лучей и радиационных поясов Земли.

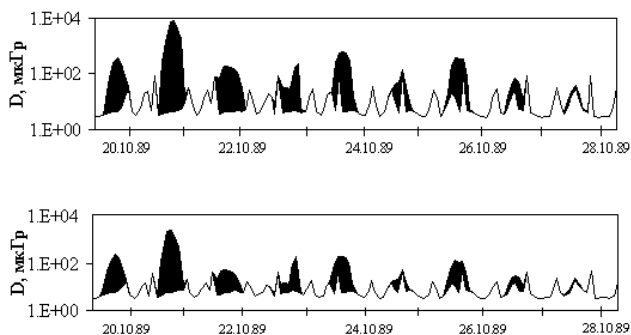


Рис. 49. Динамика поглощенной дозы на ОК МИР и МКС в октябре 1989 г.

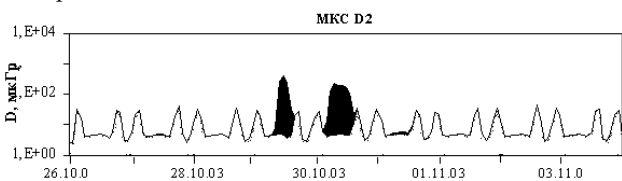


Рис. 50. То же, что на рис. 10.5, но для 26.X-03.XI. 2003г.

На рис. 51 и 52 представлена динамика расчетных значений витковой поглощенной дозы для канала D2 радиометра Р-16 на станциях МИР и МКС с использованием функций экранированности из [50] и [53] для октябрьской вспышки 1989 года и для октябрьских вспышек 2003г.

Для солнечных протонных событий 19.X.1989 г. максимум потока протонов за 20.X.1989 г. по времени совпал с минимумом  $D_{st}$  – вариации. Именно в это время орбитальный комплекс МИР проходил области полярных шапок, через которые протоны солнечных вспышек могут проникать на траекторию полета станции. Дозовый вклад от протонов СПС представлен на рис. 49 и 50 зачерненными областями. Дозовый вклад от постоянных источников – сплошной линией. В 2003 году картина прохождения протонов СПС на орбиту МКС существенно отличалась от 1989 года.

В период максимума вспышки от 28.X.2003 г. амплитуда кольцевого тока была положительной и в это время орбитальная станция совершала полет по наиболее защищенным магнитным полем Земли виткам. В связи с этим вклад в поглощенную дозу был существенно меньше, чем 20.X.1989 г.

Сопоставляя величины, представленные в таблице 2 можно оценить суммарное значение дозы по каналу D2 прибора Р-16. Исходя из значений наиболее близкого по показаниям защищенного канала блока ДБ-8 №2 суммарное значение дозы по каналу D2 прибора Р-16 оценивается как 1,4 мГр (140 мрад). Суммарное значение дозы по каналу D2 прибора Р-16 от солнечных протонных событий, зарегистрированное на станции «МИР» в октябре 1989 года составило 30,7 мГр (3070 мрад) [54]. Столь значительное различие доз при близких параметрах потоков и спектров протонов СКЛ обусловлено различием в условиях проникновения на траекторию полета станции, а также более высокой степенью защищенности прибора Р-16 на МКС по сравнению со станцией «МИР».

В заключение отметим, что работа СРК РС МКС позволила уверенно контролировать радиационную обстановку на борту МКС в период крупных солнечных протонных событий октября 2003 года. Вклад солнечных космических лучей в поглощенную дозу за 2 суток полета с 15 часов 28 октября до 15 часов 30 октября был в диапазоне от 0.85 мГр (85 мрад) до 8.65 мГр (865 мрад) в различных точках служебного модуля МКС. Это - наибольшие значения за период регистрации дозы на борту МКС.

Полученные результаты содержат исходную информацию для верификации модельных описаний радиационных условий на траектории полета МКС, методик расчета условий защищенности и значений доз на борту станции в период солнечных протонных событий.

Результаты сравнения радиационных эффектов октябрьской 2003 года бури с другими крупными магнитными бурями приводятся в отдельной работе [55].

## 5. ЭФФЕКТЫ В ОЗОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

На основе данных ИСЗ КОРОНАС и GOES о потоках солнечных космических лучей, наблюдавшихся в октябре - ноябре 2003 года, проведены расчеты ионизации высокоширотной атмосферы.

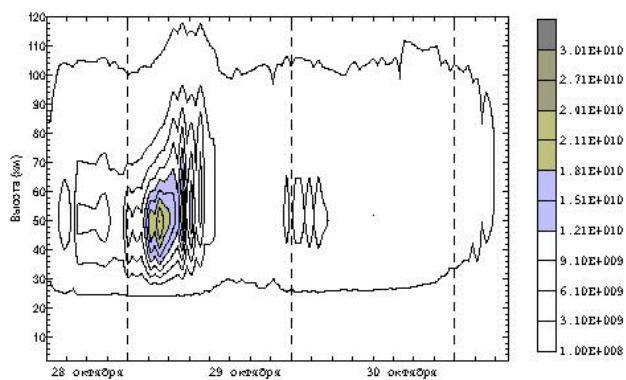


Рис. 51. Скорости ионизации солнечными протонами после вспышки 28 октября 2003 года для  $70^\circ$  с. ш. (расчет по данным спутника КОРОНАС-Ф).

Результаты расчетов, представленные на рис. 51 показали, что максимальные значения ионизации энергичными солнечными протонами для выбранной широты  $70^\circ$  N лежат в диапазоне 50 - 70 км. Наибольшую ионизацию вызвала вспышка на Солнце, имевшая место 28.X.2003 г. (максимум значений ионизации пришелся на 29 октября). В предположении о том, что каждая пара ионов, образованных солнечными протонами, приводит к

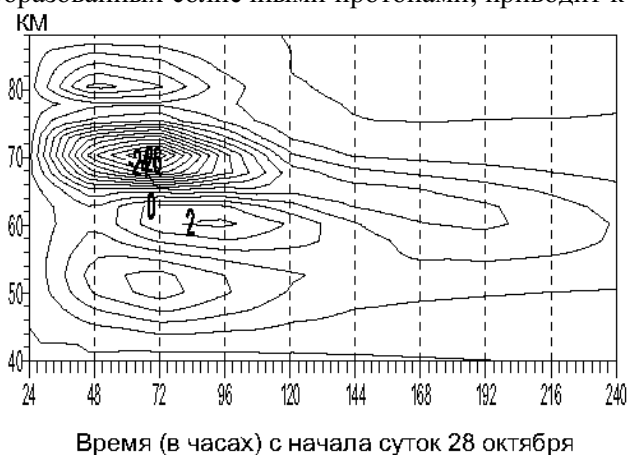


Рис. 52. Изменения (%) в содержании озона после вспышки 28 октября 2003 года для  $70^\circ$  с. ш. (результаты фотохимического моделирования).

образованию 1,25 молекулы окиси азота (NO) и двух молекул радикала OH в атмосфере Земли, было проведено численное фотохимическое моделирование отклика химического состава высокоширотной атмосферы на дополнительные источники окислов азота и водорода космического происхождения. Результаты расчетов, демонстрирующих изменение содержания озона

после солнечной вспышки 28.X.2003 г., иллюстрирует рис. 52. Показано, что в результате интенсификации каталитических циклов с участием NO и OH, разрушающих озон, концентрация озона уменьшилась вдвое на высотах максимума ионизации.

Полученные результаты моделирования, основанные на данных ИСЗ Коронас, свидетельствуют о том, что после солнечной вспышки 28.X.2003 г. воздействие энергичных протонов на атмосферу Земли должно привести к заметным изменениям как в содержании озона, так и некоторых других газовых составляющих (см. статью в настоящем выпуске [56]).

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Геомагнитные возмущения в октябре-ноябре 2003г. были откликом магнитосферы Земли на аномально большое количество мощных корональных выбросов массы, которые принесли быстрые потоки плазмы, энергичные электроны, протоны и ядра вместе с сильным и длительно существовавшим межпланетным магнитным полем, в том числе и геоэффективного южного направления. Кроме того, специфику этих возмущений определяло наложение сравнимых по силе внешних воздействий, следовавших одно за другим. Следствием этого явилась сложность ответной реакции популяций плазмы, радиационных поясов и электромагнитного поля.

1. В работе проведен предварительный анализ отечественных спутниковых и наземных измерений во время исключительно сильных магнитных бурь конца октября 2003 года. На геостационарных спутниках Экспресс-А2 и А3, а также низковысотных полярных ИСЗ Коронас-Ф и Метеор-3М проводились измерения заряженных частиц, электронов, протонов и ионов солнечного и магнитосферного происхождения в широком диапазоне энергий. Возмущения магнитного поля, вызванные экстремально высокой активностью на Солнце, исследовались на более чем двадцати магнитных обсерваториях от Ловозеро в Мурманской области до Тикси в Саха-Якутии. Получены уникальные данные по динамике ионосферы, риометрическому поглощению, геомагнитным пульсациям, наблюдениям полярных сияний в средних широтах. Авторский коллектив составили сотрудники двенадцати научных учреждений и университетов Российской

Федерации. Помимо анализа экспериментальных данных, представлены результаты численного моделирования токовых систем и магнитного поля.

2. Магнитные бури 29 - 30 октября 2003г. и по процессам на Солнце, их вызвавшим, и по параметрам солнечного ветра, и по проявлениям в магнитосфере и ионосфере Земли можно отнести к экстремальным явлениям текущего цикла солнечной активности. Представленный в данной работе предварительный анализ магнитосферных процессов показывает, что в этих событиях наблюдалось наибольшее смещение к экватору проекции границы проникновения солнечных космических лучей, высокие энергии ускоренных во внутренней магнитосфере электронов, исключительно мощные суббури, необычные по длительности и амплитуде пульсации геомагнитного поля.

3. На спутниках Экспресс зафиксированы значительные вариации интенсивности релятивистских электронов с энергиями  $E_e > 8$  МэВ - резкие спады потока 24.X.2003г. и 04.X.2003г., связанные с усилением геомагнитных возмущений во время слабых магнитных бурь, и медленное, в течение трех суток его восстановление. На фазе восстановления последней супербури наблюдалось ускорение электронов, в результате которого за 10 часов интенсивность возросла на порядок.

Появление релятивистских электронов представляет непосредственную опасность для космической техники, находящейся на высокоапогейных орбитах; кроме того, эти электроны через цепочку аэрономических реакций влияют на концентрацию мезосферного озона и далее - на атмосферную циркуляцию и погоду.

4. На спутниках Экспресс и Коронас-Ф получен временной ход интенсивности солнечных протонов, электронов и ядер в широком диапазоне энергий на геосинхронной орбите и в полярной шапке. Полученные данные, отражающие ситуацию в межпланетном пространстве, важны для исследования проблем ускорения и распространения солнечных космических лучей, а также для решения задач прикладного характера.

5. Наблюдались значительные изменения структуры протонных и электронных радиационных поясов. Внешняя граница электронного и протонного пояса смещалась до  $L = 3$ , а внутренняя граница до

$L = 2,2$ ).

В результате воздействия серии сильных магнитных бурь максимум внешнего радиационного пояса электронов с энергиями  $E_e > 8$  МэВ сместился в область L- оболочек внутреннего пояса ( $L \sim 2,5$ ).

Отмечено смещение внутренней границы плазменного слоя вплоть до  $L \sim 2,8$ .

6. Перемещение границы проникновения СКЛ является следствием кардинального изменения структуры магнитосферного магнитного поля, которое проявляется как в сильном сжатии магнитосферы, так и в приближении к Земле переднего края токового слоя.

Во время магнитных бурь граница проникновения обычно движется плавно, следуя за динамикой Dst вариации. Однако в рассматриваемом событии мы трижды наблюдали быстрый, импульсный сдвиг границы к Земле, во всех случаях совпавший с большой величиной южной компоненты межпланетного магнитного поля в возмущенном солнечном ветре и исключительно сильными магнитосферными суббуриями.

7. Показано, что граница проникновения солнечных космических лучей находится в постоянном движении не только во время магнитных бурь, но и во время суббуревой активности в пределах от  $68^\circ$  (спокойный уровень) до  $58^\circ$  в возмущенные периоды.

8. Начало восстановления Dst как 29, так и 30 октября 2003г., совпало с поворотом ММП к северу, что характерно и для слабых бурь. Известно, что такой поворот часто инициирует начало активной фазы суббури, поэтому при статистическом анализе суббури будут часто наблюдаться вблизи начала спада Dst-вариации. Мы не видим оснований для отказа от полученных ранее выводов о важной роли суббурь для развития асимметричной части кольцевого тока на главной фазе суббури. Вместе с тем, для определенных выводов о вкладе конкретных токовых систем в развитие главной фазы магнитной бури, необходима полная информация о пространственном распределении и динамике возможных носителей тока и о структуре магнитного поля. Поскольку на данный момент такой информацией мы не располагаем, допустимы и неизбежны существенные расхождения в интерпретации.

9. Кольцо активных полярных сияний на главной

фазе бури расширяется и сдвигается к экватору. Южная граница отслеживает движение границы проникновения СКЛ, а северная граница (граница полярной шапки) движется к полюсу и к экватору в ритме суббуревой активности и редко, и лишь на короткое время смещается ) ниже  $60^\circ$  исправленной геомагнитной широты.

10. В начале активной фазы второй магнитной бури 29.X.2003г. на двух оптических обсерваториях ИКФИА и в Иркутске выполнена детальная регистрация суббури в полярных сияниях на средних широтах. На ст. Маймага 29 октября максимальная интенсивность эмиссии OI 844,6 нм достигала 12 кРл. Эти уникальные наблюдения показали, что в этой суббуре присутствовали все элементы классической авроральной суббури.

Хотя в популярной литературе описания картин полярных сияний в средних широтах не редкость, научное описание, опирающееся на обсерваторские наблюдения сделано едва ли не впервые.

11. Одним из ярких проявлений большой магнитной бури в октябре 2003г. было возбуждение в дневное время 29 и 31 октября геомагнитных пульсаций Pc5, характеризующихся необычно большой (до 600 нТл) амплитудой с максимумом в спектре в полосе частот 2,5 - 5,0 мГц (периоды порядка 3 - 6 мин). Построены карты распределения интегральной интенсивности пульсаций, обнаружена их долготная асимметрия и структурирование зон пульсаций по широте. Проведен анализ и построены карты изолиний амплитуд геомагнитных пульсаций P12 и P13, зарегистрированных в ночном секторе во время наиболее интенсивных суббурь в главную фазу магнитной бури 30 октября в 18 - 22 UT.

12. Анализ данных работы ионозонда ИЗМИРАН в г. Троицке свидетельствует об исключительно высоком уровне возмущенности среднеширотной ионосферы во время экстремально сильных магнитных бурь с особенностями, характерными для высокоширотной ионосферы. В средних широтах наблюдались такие возмущения верхней атмосферы и ионосферы, которые обычно регистрируются только в авроральной зоне в Арктике или Антарктике.

13. Исследование ОНЧ-излучений на основе данных станции Якутск (ИКФИА) выявило их сложный, динамический характер, свойственный скорее авроральной, а не среднеширотной зоне. Обнаружена связь вариаций ОНЧ-излучения с

геомагнитными пульсациями в дневном секторе магнитосферы.

14. Выполнен анализ радиационной обстановки на борту Международной Космической Станции. В исследуемый период наблюдалось значительное возрастание поглощенной дозы, вызванное приходом высокоэнергичных солнечных протонов от вспышки 28.X.2003 г. Отмечается, что в период, когда поток протонов был максимальным, а Dst - вариация положительной, орбитальная станция совершала полет по наиболее защищенным магнитным полем Земли виткам. В связи с этим вклад в поглощенную дозу был существенно меньше, чем в бурю 20.X.1989 г.

15. Применение параболической модели магнитосферы для описания процессов октябрьских магнитных бурь показало хорошее согласие результатов моделирования с наблюдениями.

Предварительный анализ состояния околоземного космического пространства в октябре-ноябре 2003 года и выявленные при этом характерные особенности динамических процессов, наблюдавшихся в магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли в связи с экстраординарной активностью Солнца в конце октября 2003г. свидетельствуют о том, что реакция околоземного пространства на внешнее исключительно сильное и продолжительное возмущение отличалась особой сложностью и что, возможно, мы имеем дело с действием новых закономерностей. Координированное исследование этих процессов требует совместных усилий и кооперации ввиду их особой важности как для фундаментальной науки, так и для решения прикладных задач.

## 7. БЛАГОДАРНОСТИ

Анализ магнитосферных возмущений невозможен без использования опорных данных о параметрах солнечного ветра и геомагнитных индексах. Эти данные доступны научной общественности через публикацию открытых баз данных на сайтах, представленных в сети Интернет. (<http://swdcbd.kugi.kyoto-u.ac.jp>, <http://www.sel.noaa.gov/>, <http://www-pi.physics.uiowa.edu/cpi-data/survey/sw/2003/> и др.)

Авторы выражают благодарность экспериментальным группам, представившим эти данные. Измерения магнитного поля на многих спутниках обеспечивали приборы Х. Сингера.

Авторы благодарны наблюдателям и обработчикам данных наземных наблюдений российских обсерваторий, работа которых сделала возможной появление настоящей публикации.

Следует отметить ценную возможность получения оперативной информации глобальной сети наземных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ (INTERMAGNET), скандинавского профиля IMAGE (19 станций), европейской сети SAMNET, проекта CPMN, и австралийской сети станций.

Работа по главе 3 была проведена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 01-05-65003, 00-15-96623, 01-07-90117 и 02-05-74643) и гранта Шведской Академии наук.

Часть работ по разделам 3.1.1 и 3.1.2 выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 03-05-39011 ГФЕН.

В Иркутске работа велась при поддержке гранта РФФИ 03-05-64744 и гранта № НШ-272.2003.5 государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации.

Работа по разделу 3.1.3 выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований отделения физических наук РАН "Солнечный ветер: генерация и взаимодействие с Землей и другими планетами (ОФН-16)" и гранта РФФИ 02-05-64386.

Работа группы ЦАО была поддержана РФФИ, грант 03-05-64675.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веселовский И.С., Панасюк М.И., Базилевская Г.А. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре-ноябре 2003 г.: Причины и следствия. Настоящий сборник.
2. Petrukovich, A.A., A.A. Rusanov. AL index dependence on the solar wind input revisited // *Adv. Space Res.* 2004 (в печати).
3. Pudovkin M.I., Zaitseva S.A., Sizova L.Z. Growth rate and decay of magnetospheric ring current // *Planet. Space Sci.* 1985. V. 33. P. 1097-1102.
4. Kamide Y. Is substorm occurrence a necessary condition for a magnetic storm? // *J. Geomagn. Geoelectr.* 1992. V. 44. P. 109.
5. Sharma A.S., Valdivia J.A., Kamide Y. Dynamic relationship between storms and substorms // *Substorms-4*. Ed. by S. Kokubun and Y. Kamide. Tokyo: Terra Sci., 1998. P. 737-741.
6. Iyemori T. Substorms as a dissipation process in geomagnetic storms // *Substorms-4*. S. Kokubun and Y. Kamide, Eds. Tokyo: Terra Sci., 1998. P. 99-101.
7. Maltsev Y. P. Non-substorm Mechanism for Magnetic Storms // *Proc. 6th Int. Conf. on Substorms*, University of Washington, Seattle, March 25-29, 2002, R.M. Winglee, Ed., 2002. P. 484-489.
8. Аммосов П.П., Гаврильева Г.А. Инфракрасный цифровой спектрограф для измерения вращательной температуры гидроксила // *Приборы и техника эксперимента*. 2000 г. (ллл)6, с. 792-797.
9. Исаев С.И. Морфология полярных сияний // Л.: Наука, 1968.
10. Михалев А.В. Некоторые особенности наблюдений среднеширотных сияний и возмущений эмиссий верхней атмосферы во время магнитных бурь в регионе Восточной Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. 2001. Т. 14. № 10. С. 970-973.
11. Фельдштейн Я.И., Гальперин Ю.И. Структура авроральных вторжений в ночном секторе магнитосферы // *Космич. Исслед.* 1996. Т. 34. № 3. С. 227-247.
12. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Пер. с англ. Под ред. Медниковой Н.В. // М.: Наука, 1977.
13. Atlas of Ionograms. Report UAG-10, Shapley A.H., Ed., 268 p., 1970.
14. Sugiura M. Hourly values of equatorial Dst for IGY // *Annals of IGY*. 1964. V. 35. P. 1.
15. Афонин В.В., Коломийцев О.П., Мизун Ю.Г. Измерения электронной температуры на спутниках и особенности ее поведения в области главного ионосферного провала // *Геомагнетизм и аэрномия*. 1978. Т. 18. № 3. С. 432-435.
16. Meng C.-I. Dynamic variation of the auroral oval during intense magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 227-235.
17. Тверская Л.В., Тельцов М.В., Школьникова С.И. Динамика ночной части аврорального овала, связанная с суббуревой активностью во время магнитных бурь // *Геомагнетизм и аэрномия*. 1989. Т. 29. N 2. С. 321-323.
18. Samson J.S., Harrold B.G., Ruohoniemi J.M., Walker A.D.M. Field line resonances associated with MHD waveguides in the magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19. P. 441-444.
19. Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Зайцев А.Н., Одинцов В.И. Геомагнитные пульсации Pc5 на глобальной сети обсерваторий в магнитную бурю 24 марта 1991 г. // *Геомагнетизм и аэрномия*. 1996. Т.

36. № 1. С. 52-62.
20. Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Биттерли М., Шотт Ж.-Ж. Длиннопериодные (1 - 6 мГц) геомагнитные пульсации в начальную фазу большой магнитной бури 21 февраля 1994 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2000. Т. 40. № 4. С. 16-25.
21. Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Биттерли Ж., Биттерли М. Длиннопериодные ( $T = 8 - 10$  мин) геомагнитные пульсации в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия. 1998. Т. 38. № 4. С. 38-48.
22. Pilipenko V., Kleimenova N., Kozyreva O. et al. Long-period magnetic activity during the May 15, 1997 storm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2001. V. 63. № 5. p. 489-501.
23. Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Yu., Kalegaev V.V. Modelling of the electromagnetic field in the interplanetary space and in the Earth's magnetosphere // Space Sci. Rev. 2003. V. 107. Issue 1-2. P. 7-26.
24. Shue J.-H., Song P., Russell C.T. et al. Magnetopause location under extreme solar wind condition // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 17,691.
25. Старков Г.В. Планетарная морфология полярных сияний, Физика магнитосферы и ионосферы // С.-Петербург): Наука, 1993. С. 85-90.
26. Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. P. 4204.
27. Skoug R.M., Thomsen M.F., Henderson M.G. et al. Tail-dominated storm main phase: 31 March 2001. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108(A6). doi: 10.1029/2002JA009705.
28. Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V. et al. Magnetic storms and magnetotail currents // J. Geophys. Res. 1996. V. 101(A4). P. 7737-7747.
29. Arykov A.A., Maltsev Yu.P. Direct-driven mechanism for geomagnetic storms // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. P. 1689.
30. Дарчиева Л.А., Иванова Т.А., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. О структурных и динамических особенностях проникновения солнечных космических лучей в полярные шапки // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1973. Т. 37. № 6. С. 1313-1317.
31. Иванова Т.А., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. Эффект северо-южной асимметрии солнечных космических лучей и динамика плазменного слоя и дневного полярного каспа // Геомагнетизм и аэрономия. 1976. Т. 16. № 1. С. 159-163.
32. Дарчиева Л.А., Дронов А.В., Иванова Т.А. и др. Исследование магнитосферных процессов с помощью солнечных космических лучей // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1983. Т. 47. № 9. С. 1838-1841.
33. Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. Динамика кольцевого тока по данным прямых измерений и по данным о солнечных космических лучах в магнитосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 36. № 1. С. 107-113.
34. Дарчиева Л.А., Иванова Т.А., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. Динамика экваториальных и полярных границ проникновения солнечных протонов с энергией  $>1$  МэВ в магнитосферу во время сильной магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. № 5. С. 856-858.
35. Иванова Т.А., Кузнецов С.Н., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. Динамика низкоширотной границы проникновения в магнитосферу солнечных протонов малых энергий // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 25. № 1. С. 7-12.
36. Leske R.A., Mewaldt R.A., Stone E.C., von Rosenwinge T.T. Observations of geomagnetic cutoff variations during solar energetic particle events and implications for the radiation environment at the Space Station // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 3011-3022.
37. Кузнецов С.Н., Богомолов А.В., Гордеев Ю.П. и др. Предварительные результаты эксперимента, проводимого с помощью комплекса аппаратуры СКЛ на ИСЗ "КОРОНАС-И" // Изв. РАН. Сер. физ. 1995. Т. 59. С. 2 - 6.
38. Власова Н.А., Горчаков Е.В., Иванова Т.А. и др. Система мониторинга радиационных условий в магнитосфере Земли на российских космических аппаратах связи, навигации и телевидения // Космич. исслед. 1999. Т. 37. № 3. С. 245 - 255.
39. Балашов С.В., Иванов В.В., Максимов И.А. и др. Контроль радиационной обстановки на высокополярных космических аппаратах. Космонавтика и ракетостроение. 2003. № 1 (30). С. 95-101.
40. Кузнецов С.Н., Суворова А.В., Дмитриев А.В. Форма и размеры магнитопаузы. Связь с параметрами межпланетной среды // Геомагнетизм и аэрономия. 1998. Т. 38. № 6. С. 7-16.
41. Kuznetsov S.N., Yushkov B.Yu., Kudela K. et al. Penetration of solar energetic particles (SEP) into the magnetosphere // ISEC 2003 Radiation Belt Science, September 2 - 3, 2003, Toulouse, France. Abstracts. P. 51.
42. Williams D.J., Arens J.F., Lanzerotti L.J. Observations of trapped electrons at low and high altitudes // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. P. 5673-5696.



43. Vakulov P.V., Kovrygina L.M., Mineev Yu.V., L.V. Tverskaya L.V. Variation in intensity and spectrum of energetic electrons in Earth's radiation belts during strong magnetic disturbances // *Space Res.* 1976. V. 16. P. 529.
44. Емельяненко С.П., Кузнецов С.Н., Столповский В.Г. Внешний радиационный пояс во время сильной магнитной бури // *Космич. Исслед.* 1978. Т. 16. № 4. С. 529-543.
45. Li X., Temerin M.A. The electron radiation belt // *Space Sci. Rev.* 2001. V. 95. P. 569-580.
46. Tverskaya L.V., Ginzburg E.A., Pavlov N.N., Svidsky P.M. Injection of relativistic electrons during the giant SSC and the greatest magnetic storm of the space era // *Adv. Space Res.* 2003. V. 31. N4. P. 1033-1038.
47. Тверская Л.В. О границе инжекции электронов в магнитосфере Земли // *Геомагнетизм и Аэронавтика.* 1986. Т. 26. С. 864-865.
48. Antonova A.E., Gubar' Yu.I., Kropotkin A.P. Towards the model of relativistic electron fluxes: acceleration in the field of strong Alfvénic disturbances // *Radiation Measurements.* 1999. V. 30. Issue 5. P. 515-521.
49. Тверская Л.В., Тельцов М.В., Шумшуров В.И., Измерение дозы радиации на станции "Мир" во время солнечных протонных событий в сентябре-октябре 1989г. *Геом. и Аэрон.*, т.31, 1991, с. 928-930
50. Tvrskaya L.V., Panasyuk M.I., Reizman S.Ya., Sosnovetd E.N., Teltsov M.V., Tsetlin V.V., The features of radiation dose variations on board ISS and Mir space station: comparative study, *Adv.Space Res.*, 2004, in press
51. В.А. Бондаренко, В.Г. Митрикас, В.В. Цетлин. Крупные протонные возмущения на орбите. 14 лет спустя. <http://www.imbp.ru/webpages/win1251/Science/articles/2003/proton.doc>
52. Митрикас В.Г. Модель защищенности обитаемых отсеков служебного модуля международной космической станции // *Авиакосмическая и экологическая медицина*, в печати.
53. В.Г. Митрикас, А.Н. Мартынова. Модель защищенности обитаемых отсеков базового блока станции МИР. – *Косм. исслед.*, 1994, т.3, № 3, с.115-123.
54. Benghin V.V., Petrov V.M., Teltsov M.V. et al. Dosimetric control on board the MIR space station during the solar proton events of September - October 1989. *Nucl. Tracks Radiation Meas.* 1992. V. 20. N 1. P. 21-23.
55. Радиационная обстановка : наст. выпуск
56. Криволицкий А.А., Кузнецов С.Н., Мягкова И.Н. , Куминов А.А., Вьюшкова Т.Ю. Изменения в озоносфере Земли, вызванные ионизацией высокоширотной атмосферы солнечными протонами в октябре 2003 г. *Наст. выпуск.*