



Козырева Ольга Васильевна

ВОЛНОВАЯ СТРУКТУРА МАГНИТНЫХ БУРЬ

диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Специальность 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н. Савин Сергей Петрович (ИКИ РАН)

д.ф.-м.н. Шалимов Сергей Львович (ИФЗ РАН)

д.ф.-м.н. Леонович Анатолий Сергеевич (ИСЗФ СО РАН)

Ведущая организация:

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

Работа посвящена экспериментальному исследованию **ультранизкочастотных волн**, наблюдающихся в околоземном пространстве и выявлению особенностей, закономерностей и физических механизмов их поведения во время геомагнитных возмущений.

Актуальность темы

Научная: изучение физики процессов, происходящих во внешней геофизической оболочке Земли – магнитосфере.

- Геомагнитные пульсации играют важную роль в процессах передачи энергии в системе «солнечный ветер – магнитосфера – ионосфера – атмосфера»

- УНЧ-волны позволяют проводить дистанционное зондирование областей, недоступных непосредственным активным измерениям, и несут в себе информацию о состоянии околоземной плазмы

Практическая: УНЧ-волны оказались одним из важных факторов в задачах, связанных с новой, активно развивающейся прикладной областью космической геофизики, именуемой «космическая погода».

- Прогноз возрастания потоков высокоэнергичных электронов в магнитосфере во время магнитных возмущений

- Задачи гелиобиологии

Цель работы

Целью работы является создание феноменологической картины волновой динамики развития магнитных бурь и суббурь

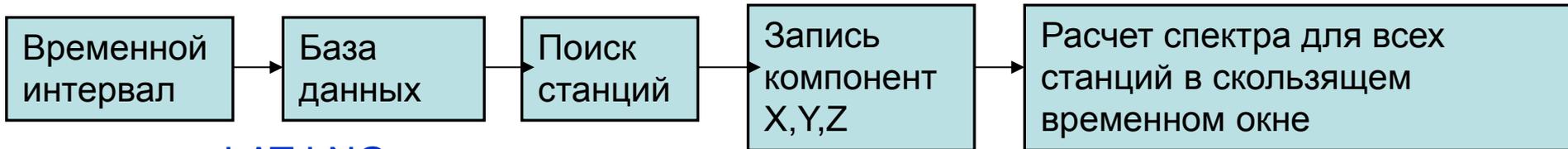
Задачи исследования

1. Анализ глобального распределения по земной поверхности спектральной мощности пульсаций диапазона Pc5 (3-10 мин) на разных фазах магнитных бурь
2. Разработка нового УНЧ-индекса, характеризующего мощность волн Pc5 диапазона на земной поверхности, в магнитосфере и межпланетном пространстве
3. Определение специфики волновых возмущений на очень высоких широтах
4. Анализ взаимодействия УНЧ волн, ОНЧ излучений и потоков энергичных частиц в магнитосфере
5. Выявление возможной взаимосвязи между квазипериодическими возмущениями геомагнитного поля и вариациями атмосферного электрического поля

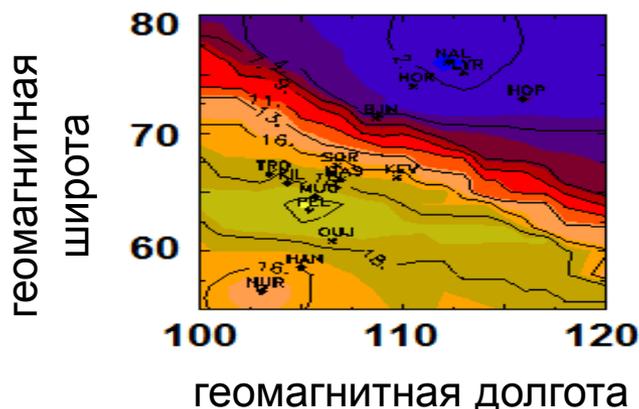
Методы обработки и представления данных

- В работе использовались различные методы анализа данных:
 - цифровая фильтрация;
 - спектральный анализ;
 - Вейвлет-анализ;
 - кластерный анализ;
 - корреляционный анализ;
- **Все методы были специально адаптированы для геофизических данных.**
- **Создан специализированный пакет программ для анализа и визуализации спектрально-пространственно-временной картины распространения УНЧ-волн, который позволяет проводить анализ по многим станциям.**

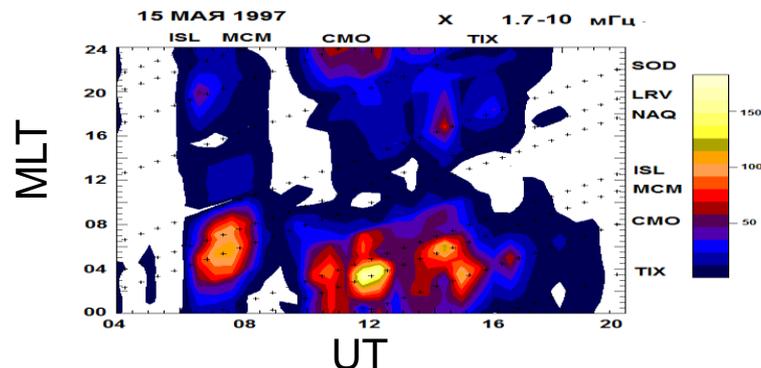
Методики построения глобального спектрально-пространственно-временного распределения геомагнитных пульсаций



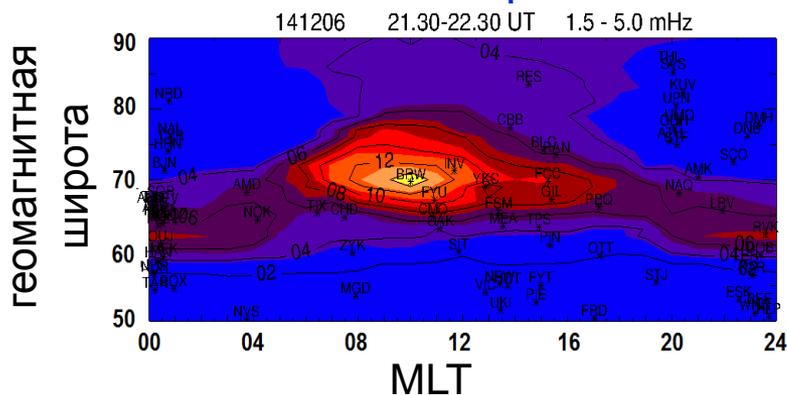
LAT-LNG карты



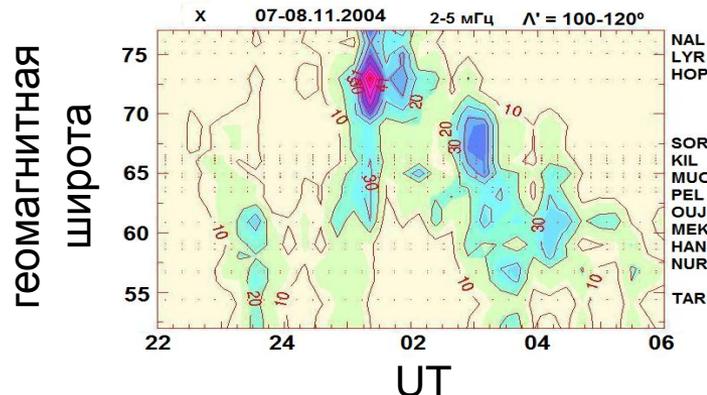
MLT-UT карты



LAT-MLT карты



LAT-UT карты

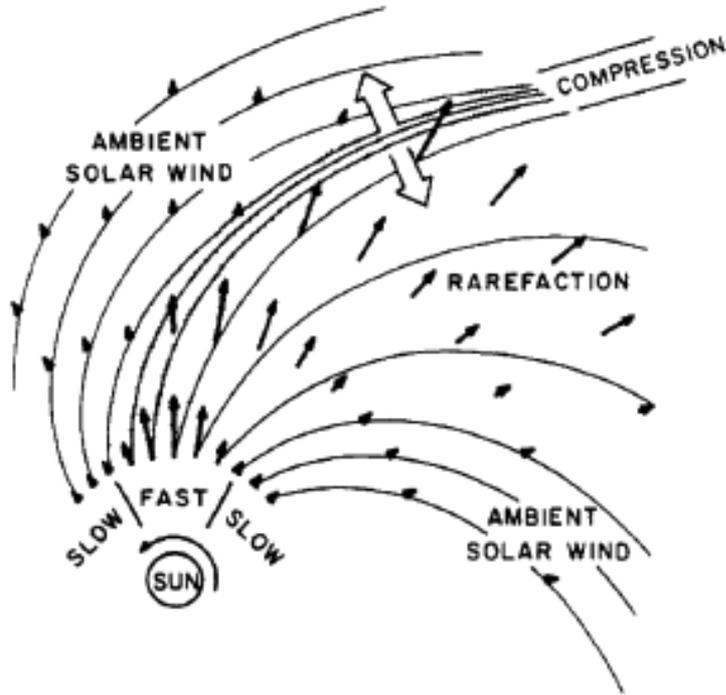


Положения, выносимые на защиту

1. Пульсации диапазона Pc5-6 являются неотъемлемым элементом магнитных бурь, при этом на разных фазах бури механизмы возбуждения и физическая природа этих колебаний различны.
2. На высоких широтах, являющихся проекциями пограничных областей магнитосферы – каспа, входных слоев, и полярной шапки, действуют специфические механизмы возбуждения особых типов УНЧ колебаний.
3. УНЧ волны могут вызывать модуляцию потоков захваченных и высыпающихся энергичных магнитосферных электронов и их ускорение до релятивистских энергий, при этом флуктуирующие потоки высыпающихся электронов приводят к модификации E-слоя ионосферы и генерации геомагнитных колебаний.
4. Высокоширотные УНЧ колебания являются агентом, осуществляющим связь между геомагнитными возмущениями и атмосферным электричеством.
5. Геомагнитный волновой индекс, характеризующий уровень УНЧ волновой активности в околоземном пространстве, является важной характеристикой космической погоды.

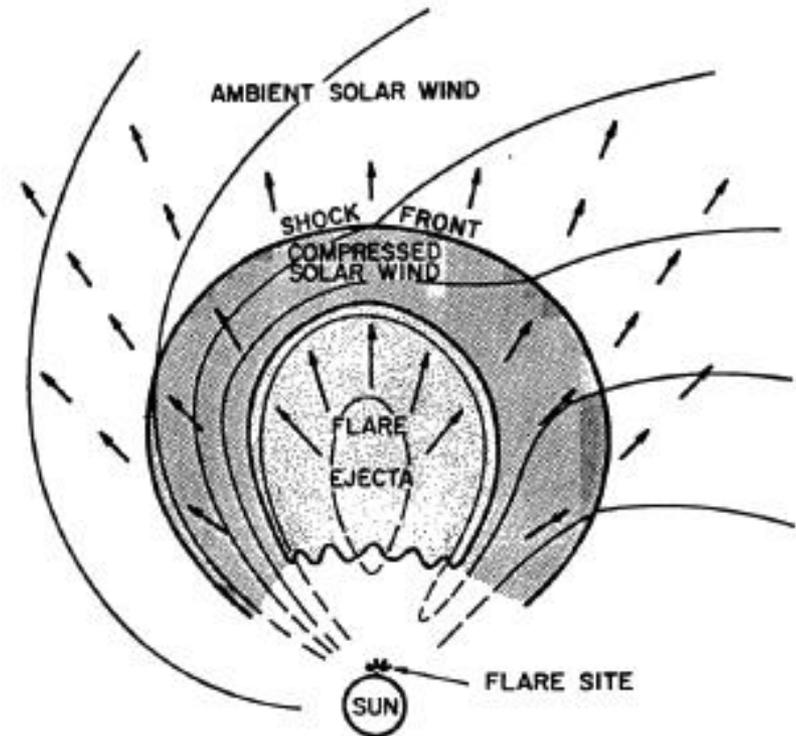
Результаты исследования волнового почерка магнитных бурь и суббурь в зависимости от фазы бури, её интенсивности и условий в солнечном ветре

Высокоскоростные потоки солнечного ветра



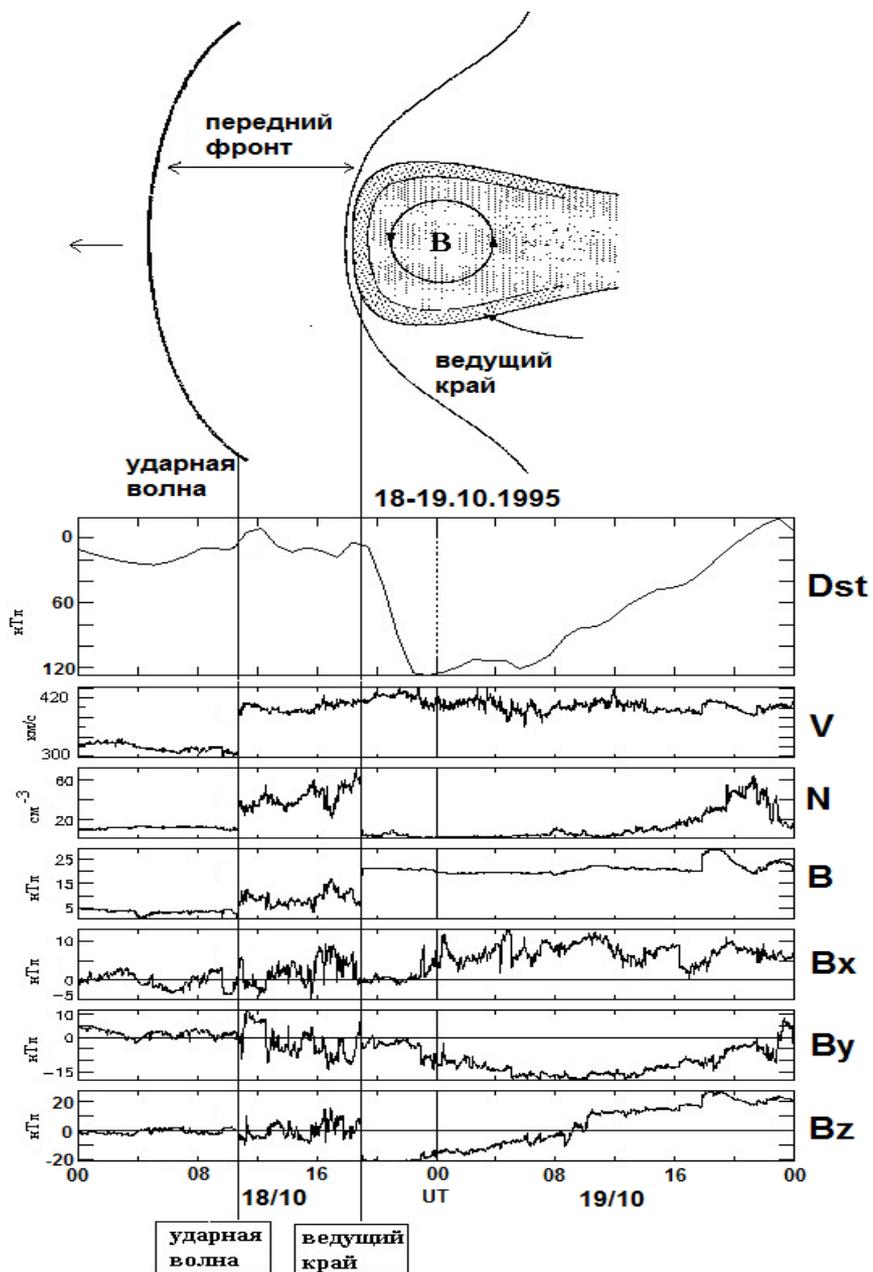
Слабые бури

Выбросы корональной массы Солнца

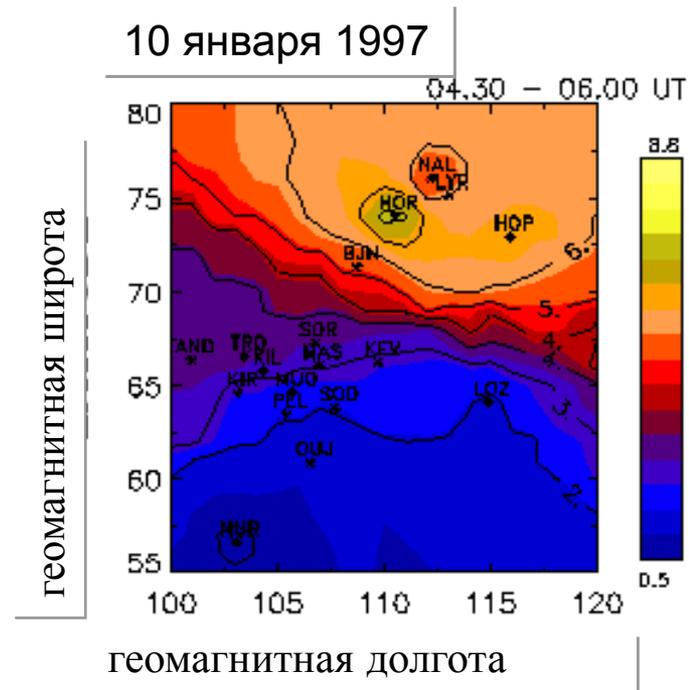
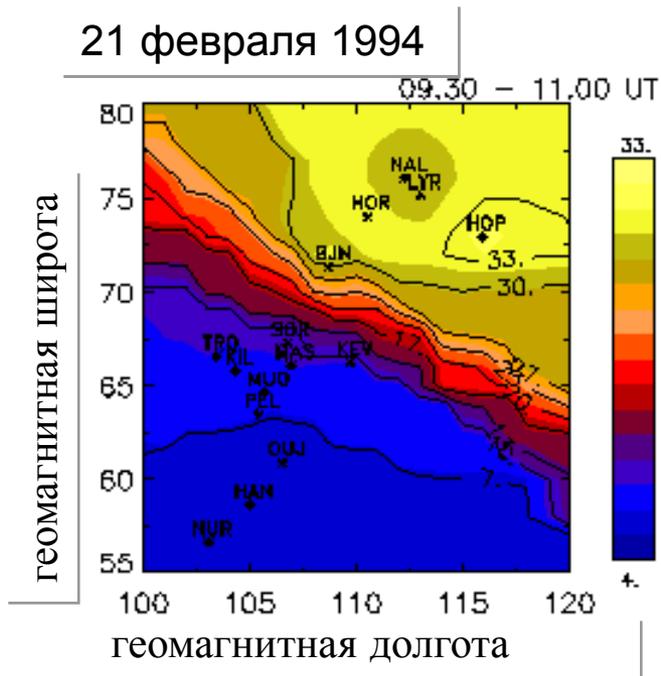


Сильные бури

Бури, вызванные межпланетными магнитными облаками



Возбуждение УНЧ колебаний в начальную фазу магнитных бурь

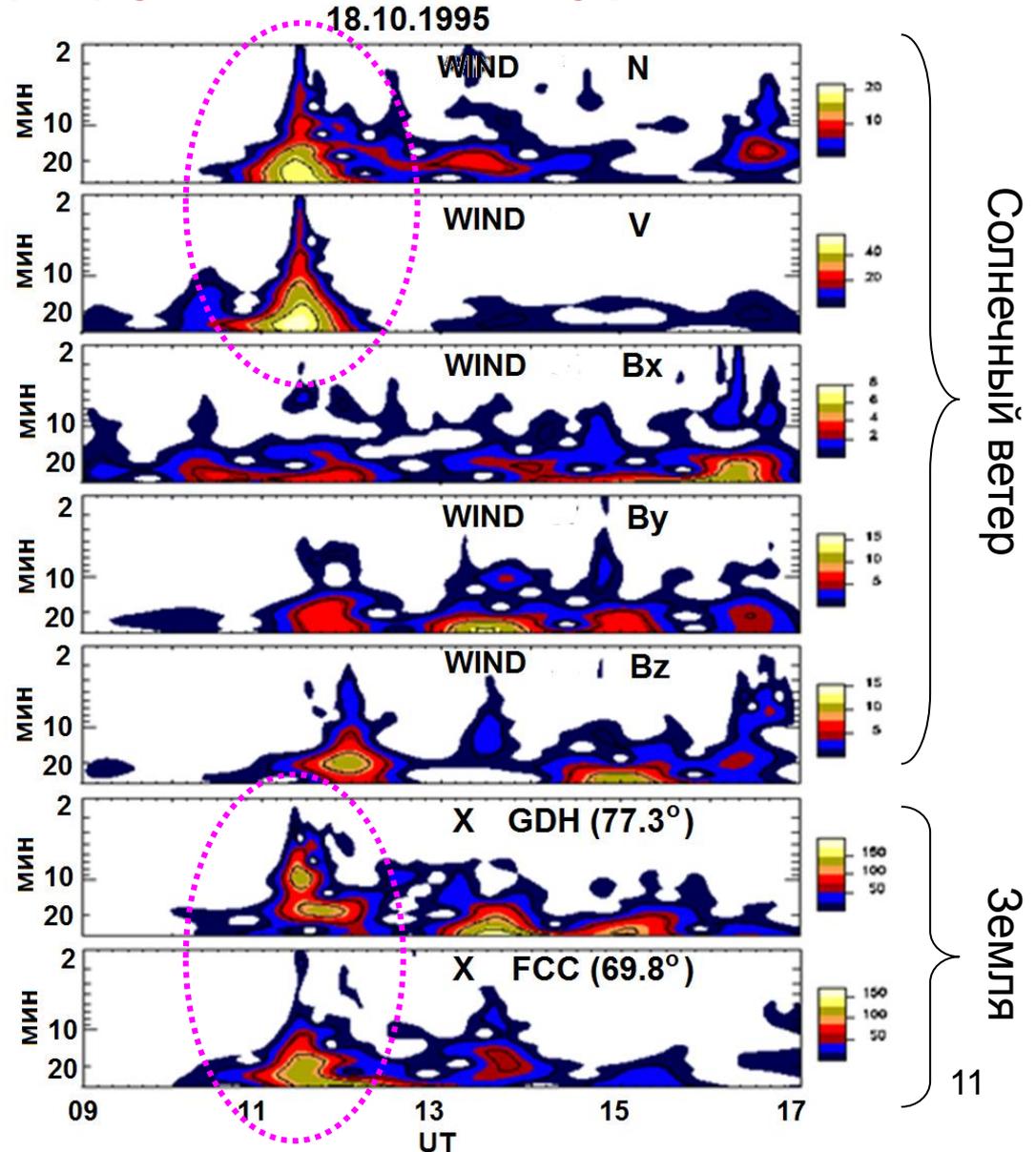


Показано, что во время прохождения орбиты Земли турбулентной оболочкой магнитного облака, наиболее интенсивные Pc5-6 пульсации наблюдаются в утренне-дневном секторе полярной шапки, а не в авроральных широтах.

Проникновение МГД-волн во внешнюю магнитосферу в начале бури

Показано, что в начальную фазу бури изолированные высокоширотные всплески Pc5-6 пульсаций на земной поверхности наблюдаются **синхронно** с появлением аналогичных волновых пакетов в вариациях параметров межпланетного магнитного поля и солнечного ветра на переднем фронте магнитного облака.

Основным агентом, вызывающим возбуждение этих полярных пульсаций, является **прямое проникновение** гидромагнитных волн из межпланетной среды.

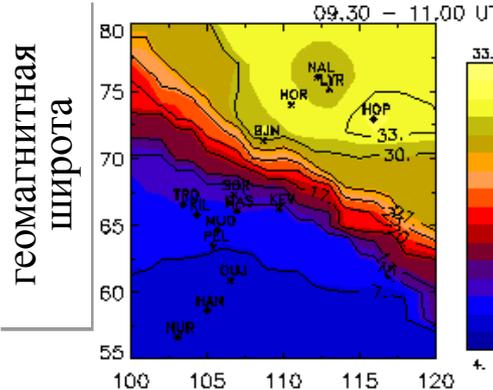


Главная фаза магнитной бури

НАЧАЛЬНАЯ ФАЗА

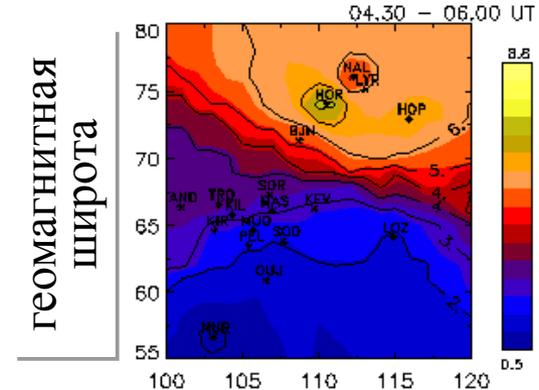
21 FEB 1994

09.30 – 11.00 UT



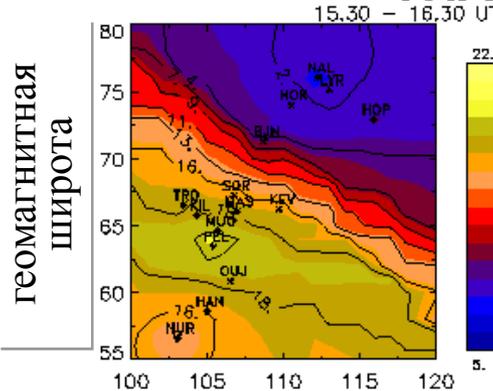
10 JAN 1997

04.30 – 06.00 UT

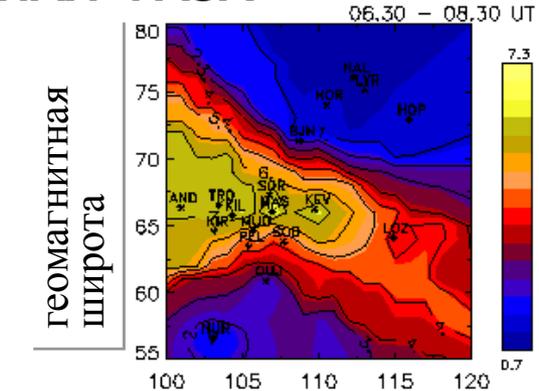


ГЛАВНАЯ ФАЗА

15.30 – 16.30 UT

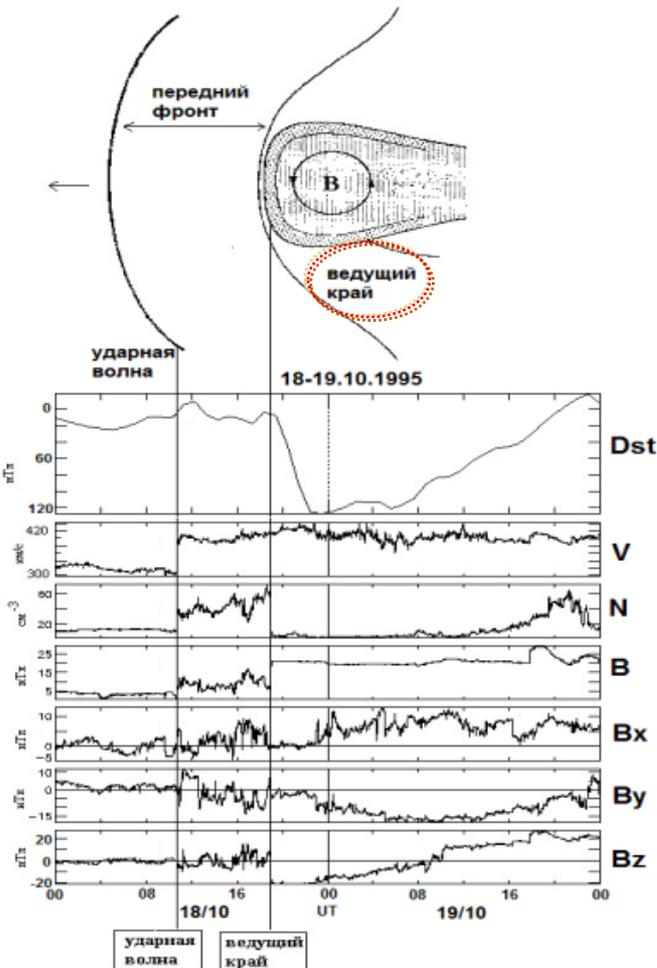


06.30 – 08.30 UT



геомагнитная
долгота

геомагнитная
долгота



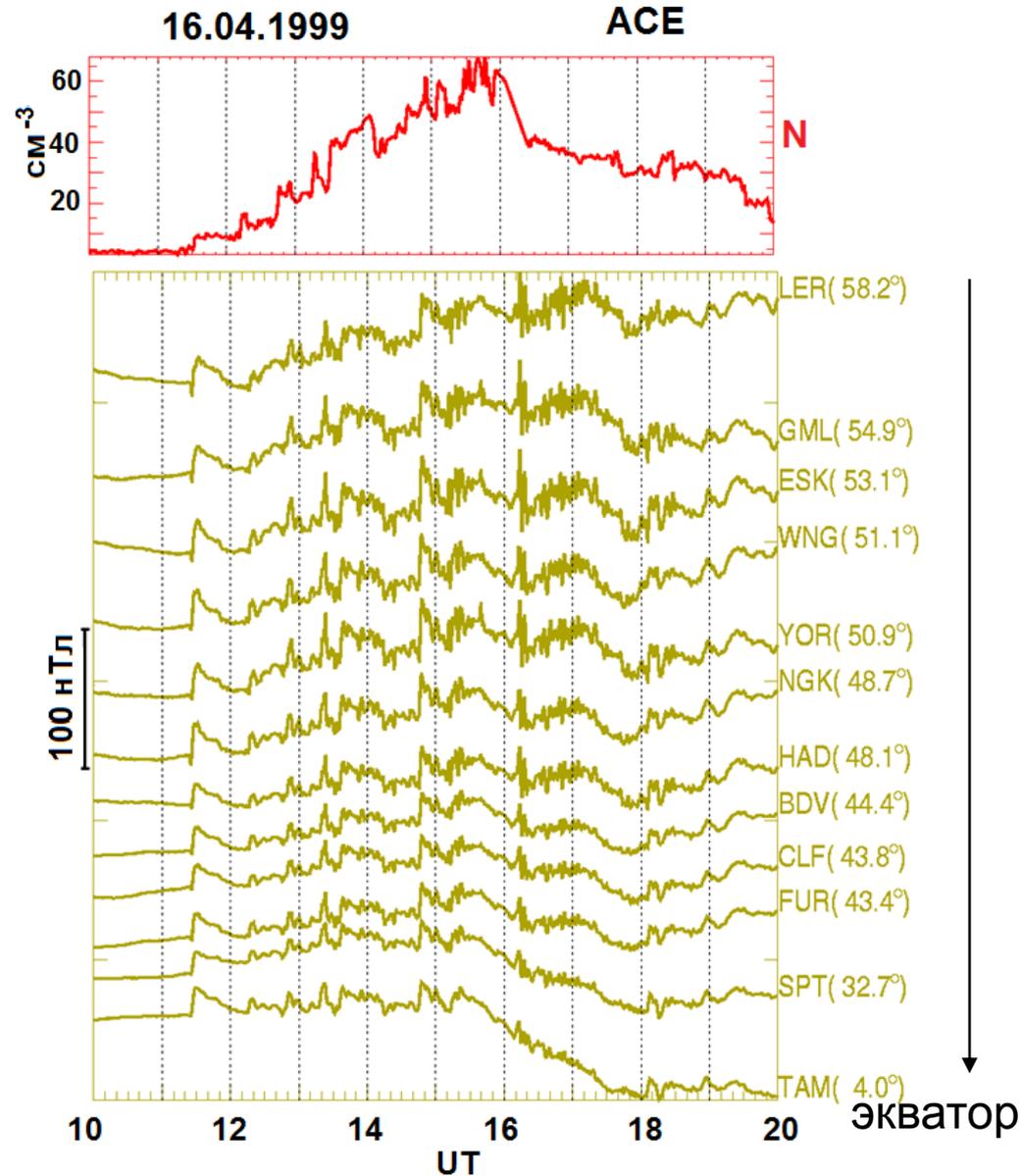
Показано, что с подходом к магнитосфере Земли ведущего края магнитного облака и началом главной фазы бури максимум интенсивности волновой активности резко перемещается в замкнутую магнитосферу.

Глобальные Pc5 пульсации в начальную фазу магнитной бури

В работе был обнаружен принципиально новый класс пульсаций.

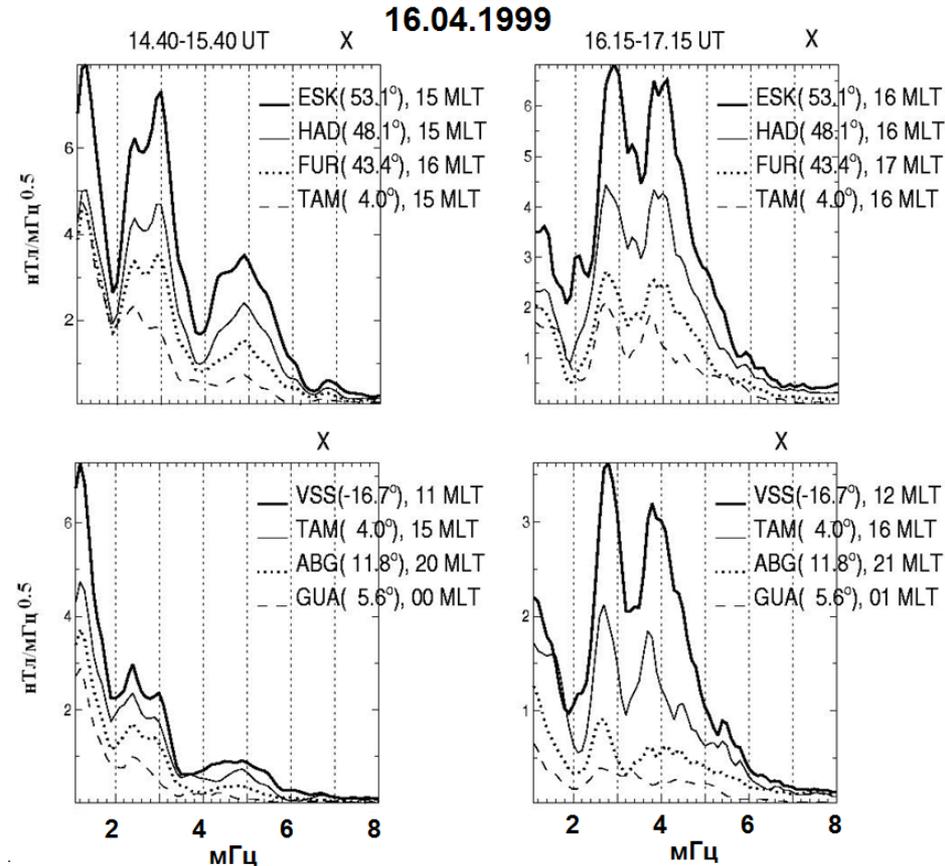
В начальную фазу магнитной бури при большом динамическом давлении солнечного ветра и положительной Vz-компоненте межпланетного магнитного поля возбуждаются **глобальные Pc5 пульсации**.

Выявлена триггерная стимуляция глобальных Pc5 волн всплесками флуктуаций плотности солнечного ветра.



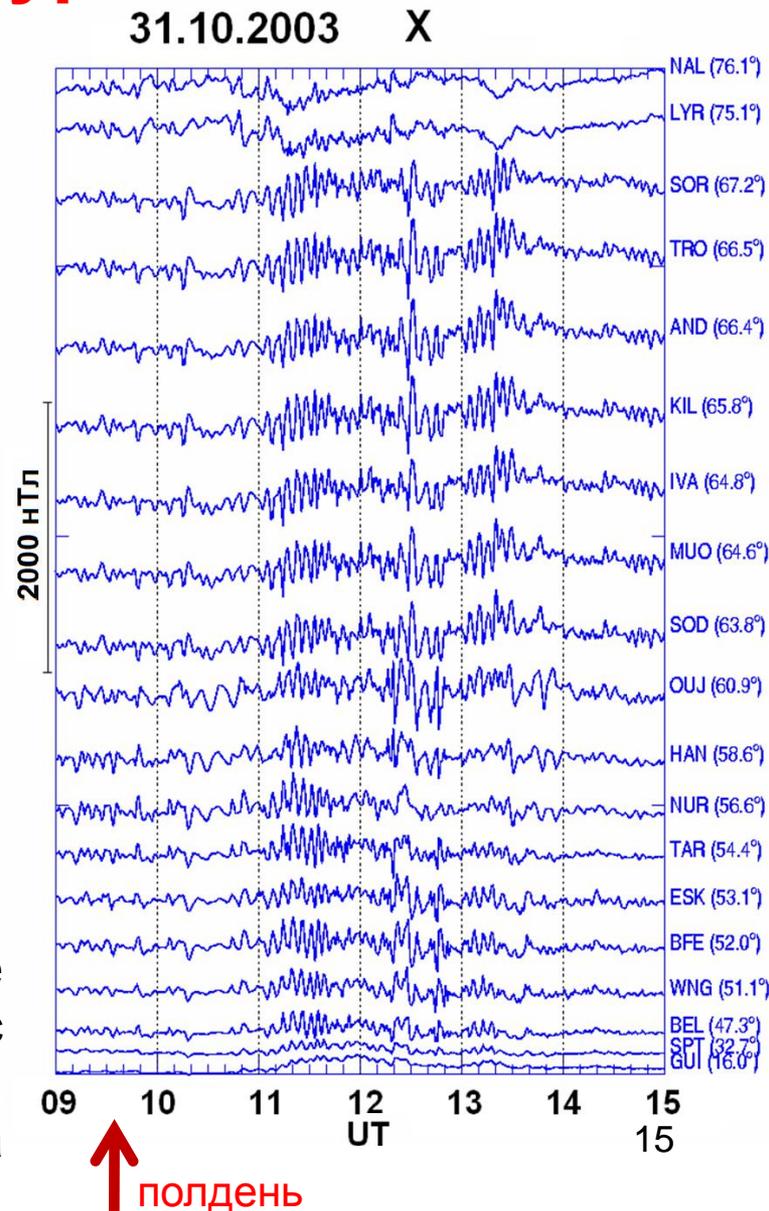
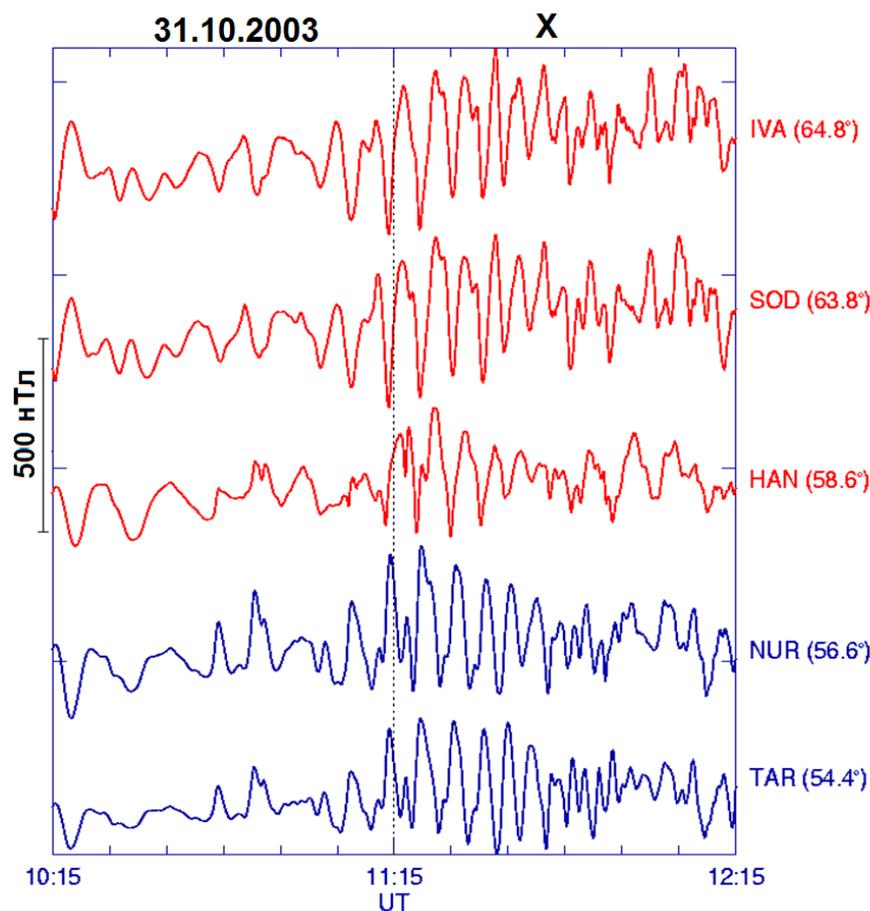
Глобальные Pc5 пульсации

Глобальные Pc5 пульсации	Обычные Pc5 пульсации
Синхронно возбуждаются от полярных до экваториальных широт	Наблюдаются в авроральных широтах (65° - 70°)
Максимум частоты в спектре не зависит от широты	Максимум частоты зависит от широты
Имеют наибольшую амплитуду в послеполуденные часы	Имеют наибольшую амплитуду в утренние часы
Малые волновые числа ($m \sim 1$)	Волновые числа $m \sim 3-5$



Таким образом, в работе был обнаружен **новый класс геомагнитных пульсаций**, которые, возможно, представляют собой собственные моды МГД волновода, образующегося во внешней магнитосфере.

Глобальные Pc5 пульсации восстановительной фазы супербури



Происходит необычно глубокое проникновение послеполуденных волн в магнитосферу: с двумя областями усиления Pc5 пульсаций, разделенных переверотом фазы волны на плазмопаузе.

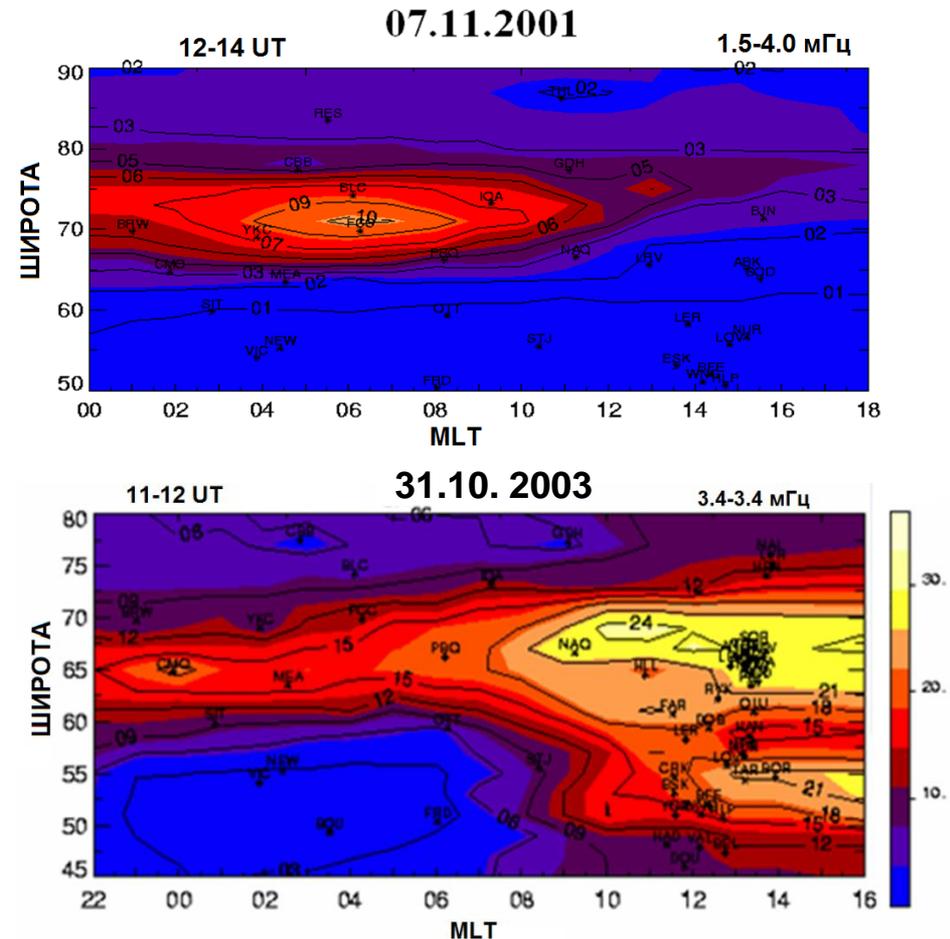
Глобальные Pc5 пульсации восстановительной фазы супербури

Пример типичного распределения Pc5 пульсаций в восстановительную фазу **обычной бури**

Распределение Pc5 пульсаций в восстановительную фазу **супербури**:

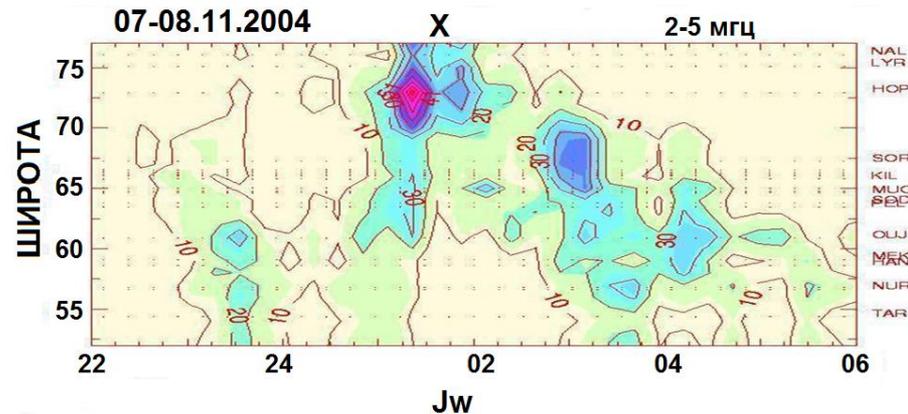
Наблюдается пространственная асимметрия генерации геомагнитных пульсаций Pc5:

В утреннем секторе интенсивные колебания регистрируются в авроральных широтах, а в послеполуденном – в субавроральных и средних широтах.

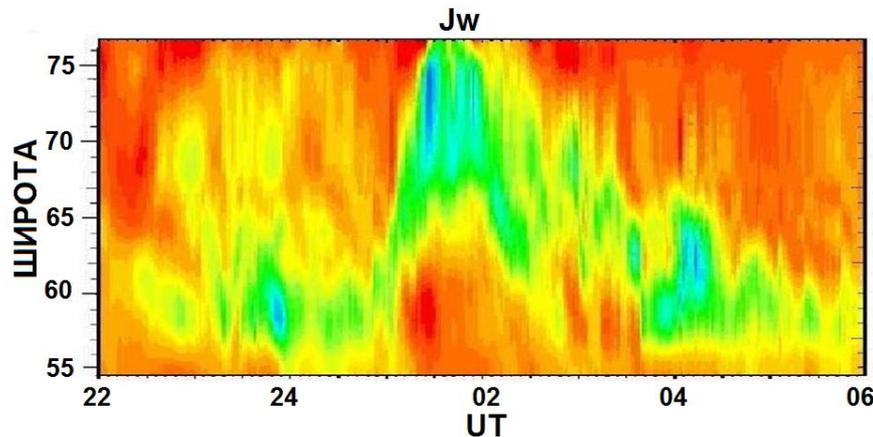


Таким образом, глобальные Pc5 пульсации наблюдаются как на начальной фазе сильных бурь, так и на восстановительной фазе **супербурь**.

Особенности пространственно-временной динамики пульсаций P_i3 во время главной фазы супербурь



P_i3 пульсации



Авроральный
электроджет

Развитие суббуревой активности в ночном секторе магнитосферы во время главной фазы магнитной бури сопровождается возбуждением иррегулярных пульсаций P_i3.

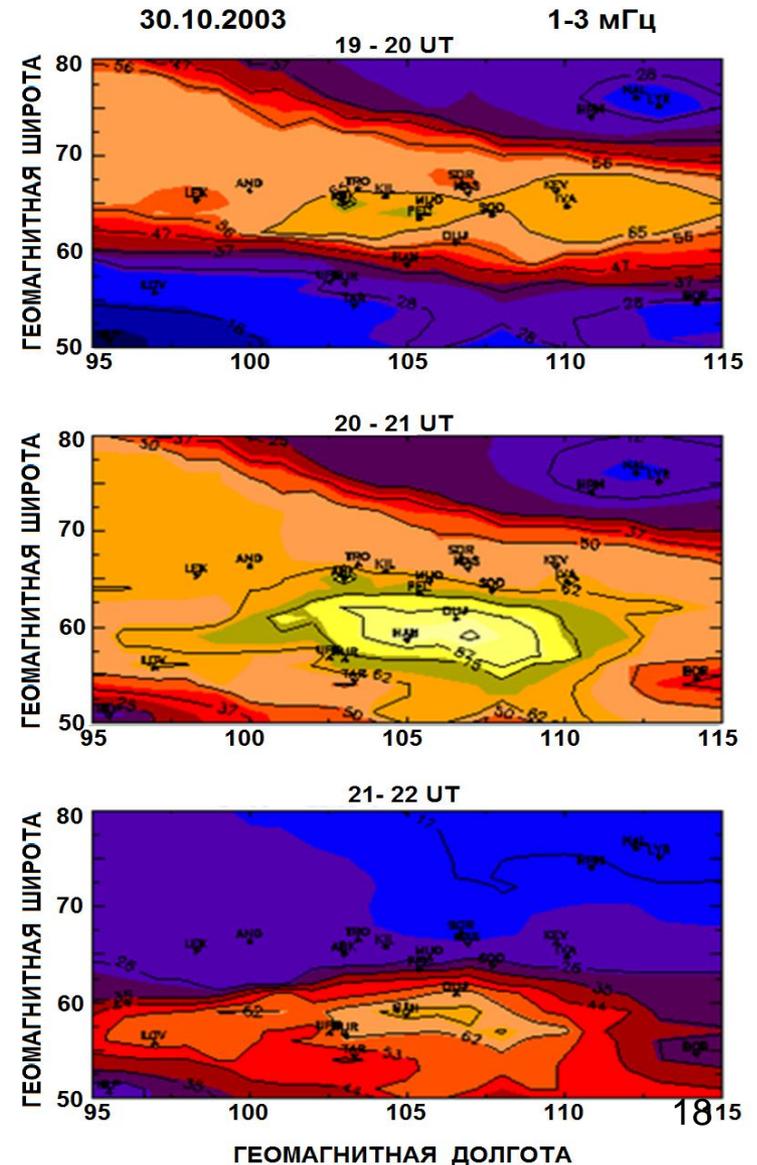
Показано, что динамика пульсаций P_i3 полностью отражают пространственно-временную динамику суббурь.

Особенности пространственно-временной динамики пульсаций во время главной фазы супербури

Во время главной фазы супербури 30.10.2003 происходило необычно большое смещение полярной границы $Pi3$ возмущений в более низкие широты, а не к полюсу, как в обычные бури.

По-видимому, эта граница является также полярной границей авроральной зоны.

Таким образом, пространственная динамика западной электроструи, геомагнитных пульсаций $Pi3$ и высыпаний энергичных частиц подобна, что свидетельствует об их общем источнике.



Положение 1. Пульсации диапазона $Pc5-6$ являются неотъемлемым элементом магнитных бурь, при этом на разных фазах бури механизмы возбуждения и физическая природа этих колебаний различны.

- Показано, что начальная фаза магнитной бури характеризуется возбуждением $Pc5$ пульсаций с наибольшей амплитудой в утреннем секторе полярной шапки.
- Выявлено, что основным агентом, вызывающим возбуждение этих полярных пульсаций, является прямое проникновение в магнитосферу флуктуаций межпланетного магнитного поля.
- Показано, что в главную фазу бури, при подходе ведущего края магнитного облака, волновая активность резко перемещается из полярных широт в замкнутую магнитосферу.
- Обнаружен качественно новый класс геомагнитных пульсаций - глобальные $Pc5$ пульсации. Эти пульсации имеют аномально большую амплитуду (до 600 нТл) и проникают в магнитосферу до низких широт.
- Глобальные $Pc5$ пульсации могут наблюдаться как в начальную фазу сильных магнитных бурь, при большом динамическом давлении солнечного ветра и северной ориентации ММП, так и на восстановительной фазе супербурь. Высказана гипотеза, что глобальные $Pc5$ пульсации являются собственными модами магнитосферного МГД волновода.

Определение специфики волновых возмущений на очень высоких широтах

Рассмотрены пространственно-временные характеристики пульсаций в каспе по данным станций, расположенных в Арктике и Антарктике

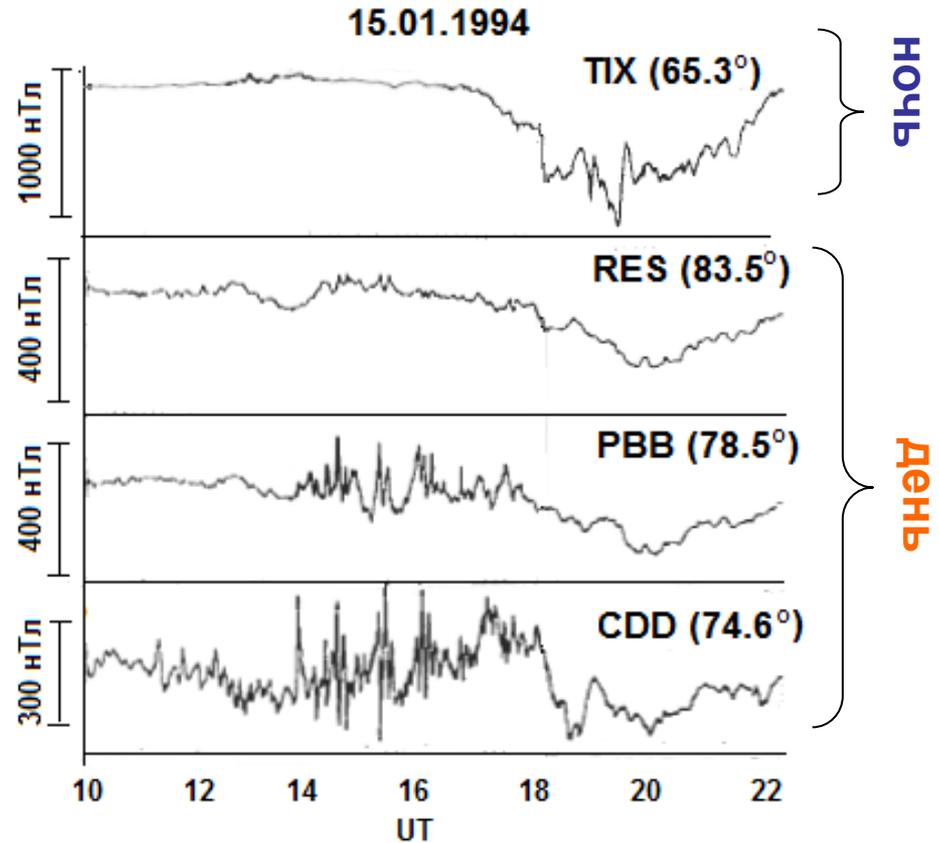
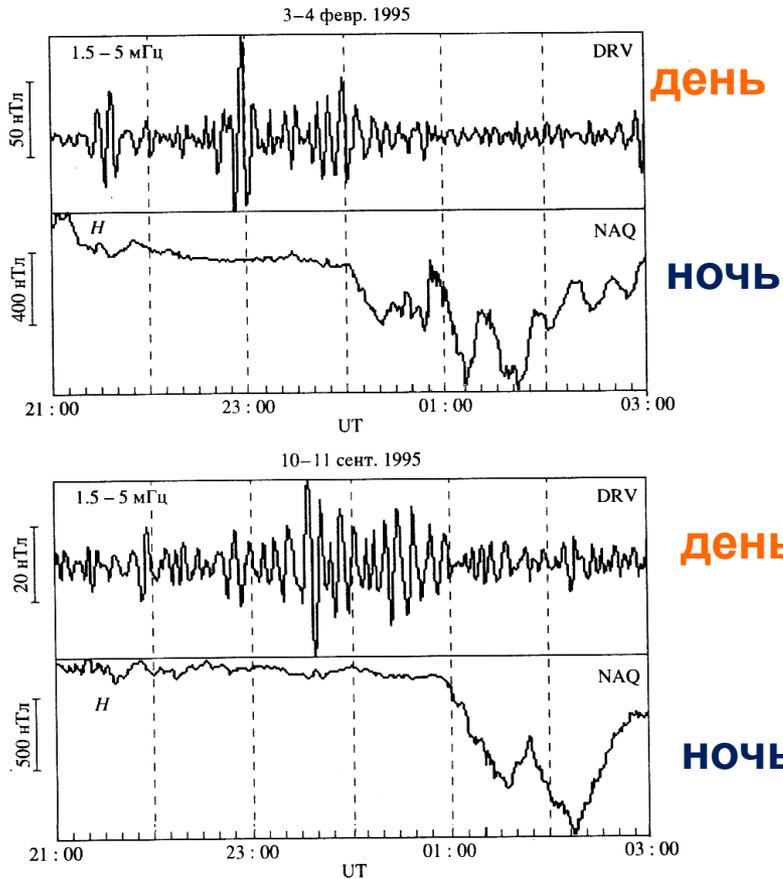
Показано, на высоких широтах в одном и том же частотном диапазоне ~ 1.5-2.5 мГц наблюдаются три различных типа пульсаций: **ipcl**, **Pi3** и **Pc5**:

В **околополуденные часы** наиболее интенсивными пульсациями являются локальные иррегулярные колебания **ipcl**, наблюдаемые вблизи ионосферной проекции каспа и входных слоев магнитосферы.

В **утренние часы** квазимонохроматические **Pc5** пульсации наблюдаются в восстановительную фазу суббури на широтах ~ 65°-70°.

В **вечерние и ночные часы** возбуждаются всплески иррегулярных **Pi3** пульсаций с нестационарным спектром, сильно локализованные по широте.

Связь внезапных прекращения геомагнитных пульсаций в каспе с началом суббури на ночной стороне



Обнаружено, что начало суббури приводит к резкому подавлению ирси-пульсаций не только на широте возможной проекции дневного каспа, но и на всех широтах, где эти пульсации регистрировались до начала суббури.

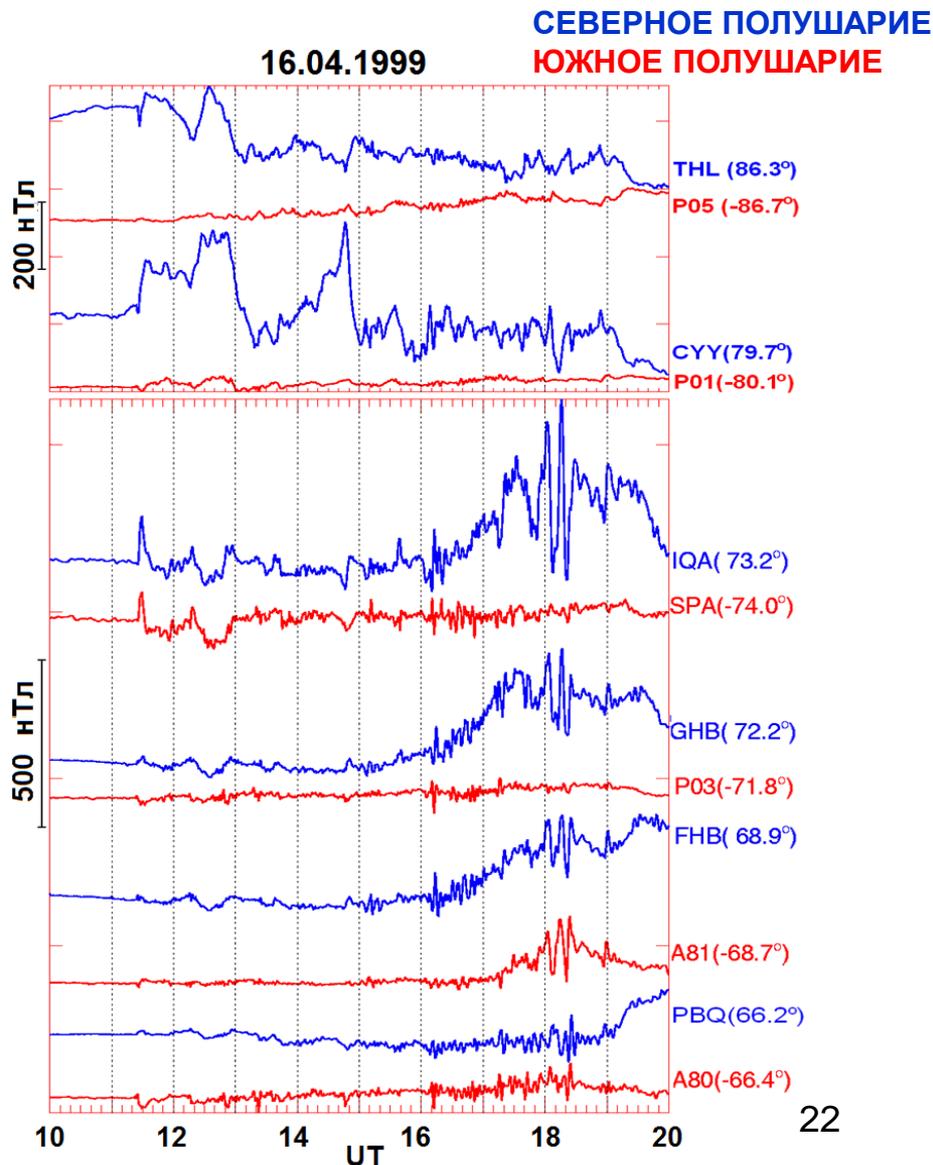
Это показывает, что процесс развития суббури охватывает значительно более обширные области магнитосферы, чем считалось ранее.

Ассиметрия длиннопериодных пульсаций в высоких широтах

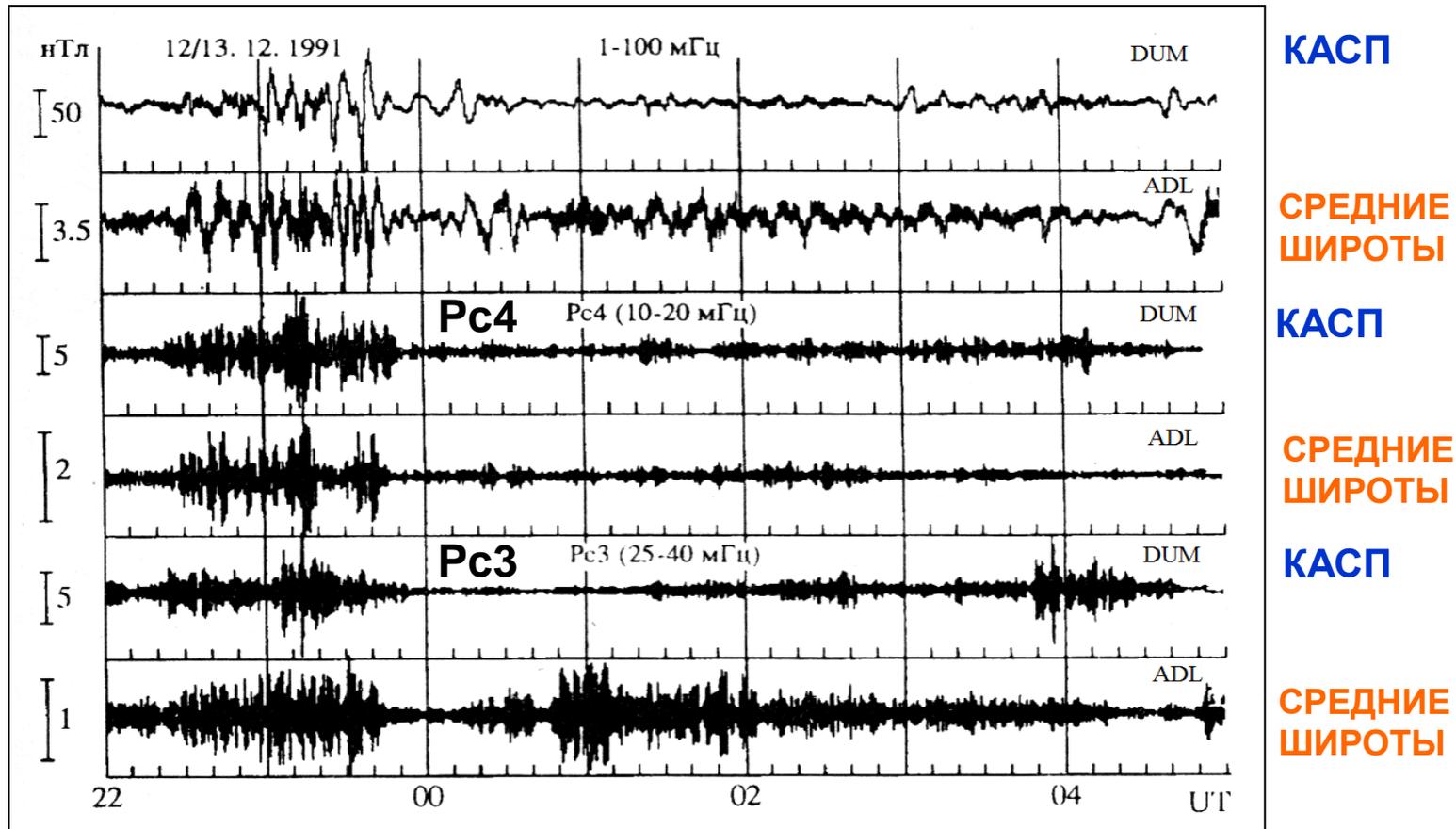
Была обнаружена межполушарная асимметрия в поведении пульсаций в высоких широтах:

- В северном полушарии пульсации наблюдались в более обширной области широт, чем в южном полушарии.
- Максимум амплитуды колебаний в северном полушарии наблюдался на более высоких широтах, чем в южном.
- Амплитуда пульсаций на геомагнитных широтах ниже 74° северном полушарии была выше, чем в южном.

Это объясняется резким отличием в географических широтах и долготах, определяющих проводимость ионосферы, магнитосопряженных областей.



Геомагнитные пульсации Pc3-4 на широтах полярного каспа и в средних широтах



Показано, что Pc3-4 пульсации в области каспа и на средних широтах имеют общий источник - форшок, однако каналы проникновения волновой энергии из области перед магнитосферной ударной волной на средние и на высокие широты различны.

Положение 2. На высоких широтах, являющихся проекциями пограничных областей магнитосферы – каспа, входных слоев, и полярной шапки, действуют специфические механизмы возбуждения особых типов УНЧ колебаний.

- Обнаружен эффект резкого подавления дневных колебаний в каспе во время начала суббури на ночной стороне.
- В интенсивности длиннопериодных пульсаций на широтах каспа проявляется северо-южная асимметрия, обусловленная как контролем ионосферной проводимости, так и несимметричным распределением продольных токов между полушариями.
- Pc3-4 пульсации в области каспа и на средних широтах имеют общий источник - форшок, однако каналы проникновения волновой энергии из области перед магнитосферной ударной волной на средние и высокие широты различны.

Анализ взаимодействия УНЧ-волн, ОНЧ-излучений и потоков энергичных частиц

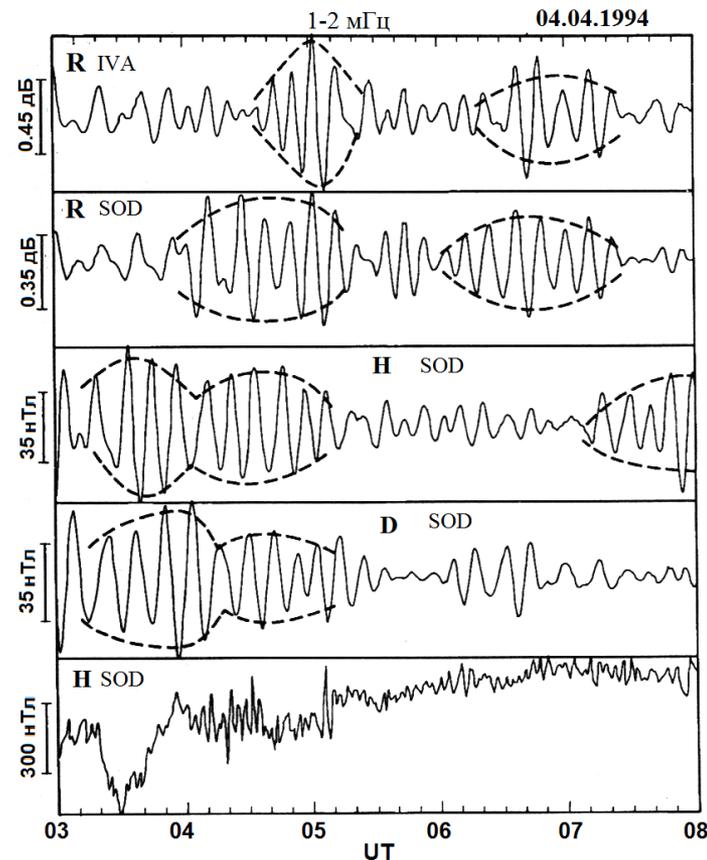
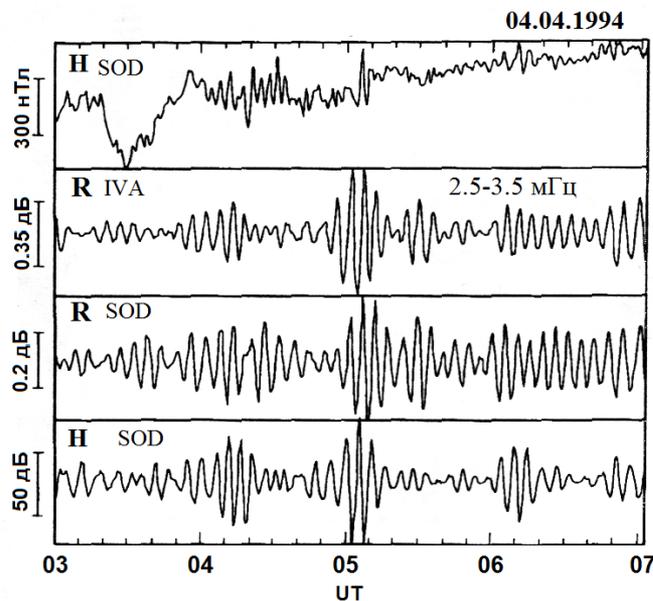
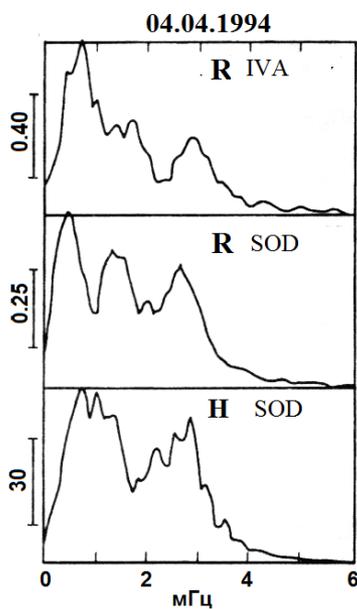
УНЧ волны тесно связаны с энергичными частицами, между ними могут происходить различные виды взаимодействий:

- возбуждение УНЧ волн в результате неустойчивости энергичных частиц;
- модуляция ионосферных полей и токов электрическим полем волны,
- квази-периодическое высыпание частиц и модификация ионосферы,
- модуляция потоков захваченных в магнитосферную ловушку частиц волнами;
- ускорение экваториальных и авроральных электронов УНЧ волнами.

Рассмотрено магнитосферно-ионосферное взаимодействие на разных фазах магнитных бурь и суббурь по данным одновременных наблюдений:

- геомагнитных вариаций и пульсаций (магнитометры)**
- полярных сияний (фотометры),**
- высыпаний энергичных частиц (риометры)**
- интенсивности ОНЧ излучений (приемники)**

Высыпания энергичных электронов и геомагнитные пульсации Pc5/Pi3 в полярных широтах



- Во время суббури в утренние часы в авроральных широтах пульсирующие высыпания электронов синхронны с геомагнитными Pc5 пульсациями только на частотах $f > 2$ МГц.
- Пульсации с $f < 2$ МГц не сопровождаются подобными пульсациями в риометрическом поглощении

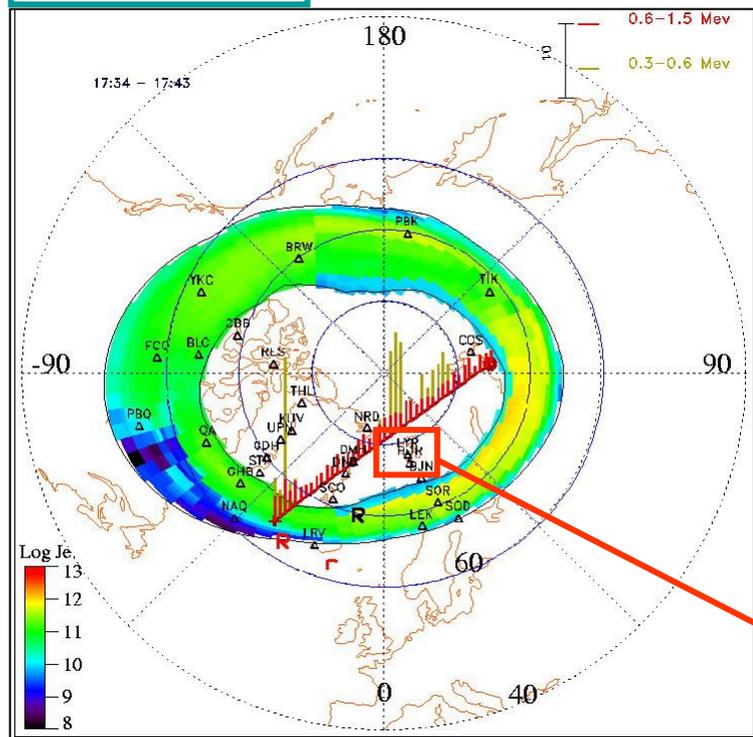
Возможной причиной этого является особенность модуляции коэффициента питч-угловой диффузии электронов альвеновскими волнами.

Высыпания энергичных электронов и пульсации P₁₃ в полярных широтах

Проведен сравнительный анализ высыпаний электронов (300-600 кэВ) в полярных областях по данным спутника КОРОНАС-Ф и наземных наблюдений магнитного поля и энергичных частиц (риометрическое поглощение и полярные сияния) вблизи проекции орбиты спутника.

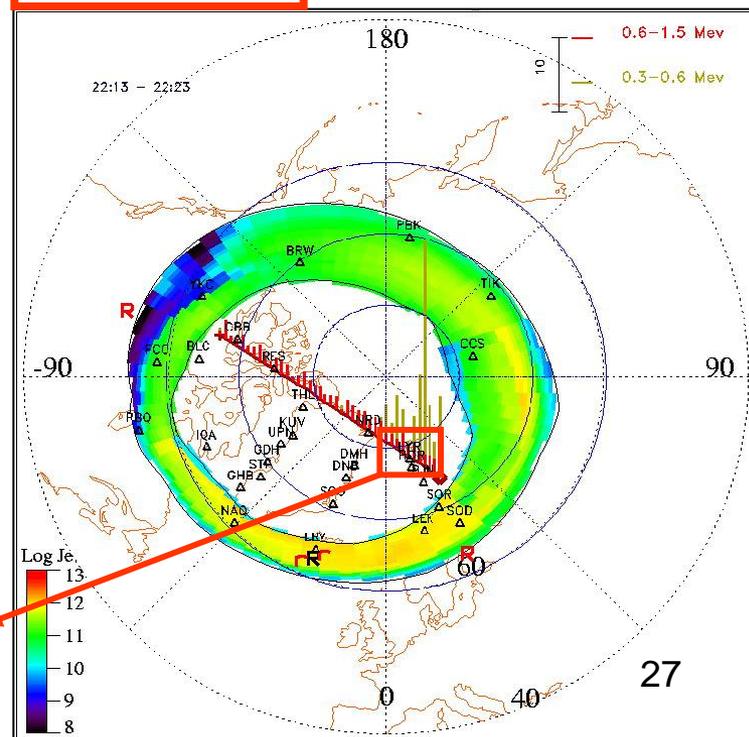
17:34 – 17:43

Пролет I



22:13 - 22:23

Пролет II



Высыпания энергичных электронов и пульсации P₁₃

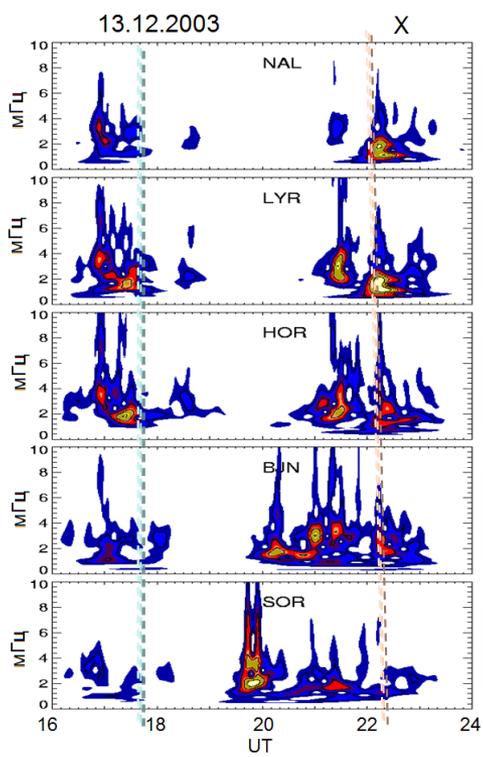
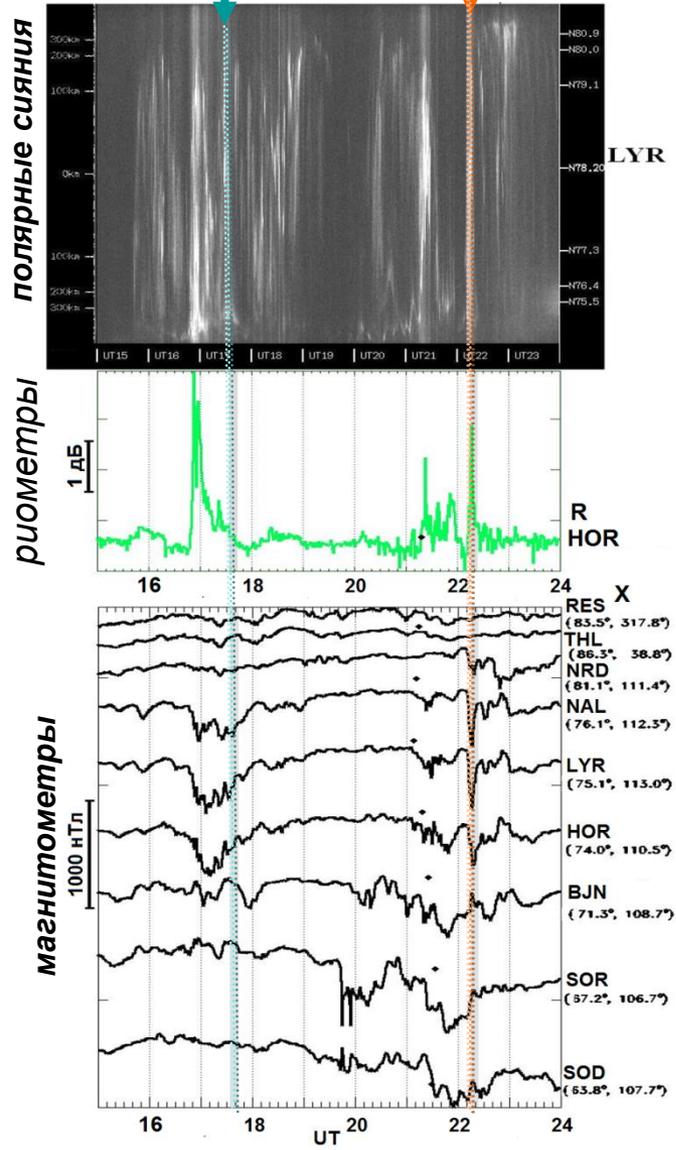
Пролет I

Пролет II

17:34 – 17:43

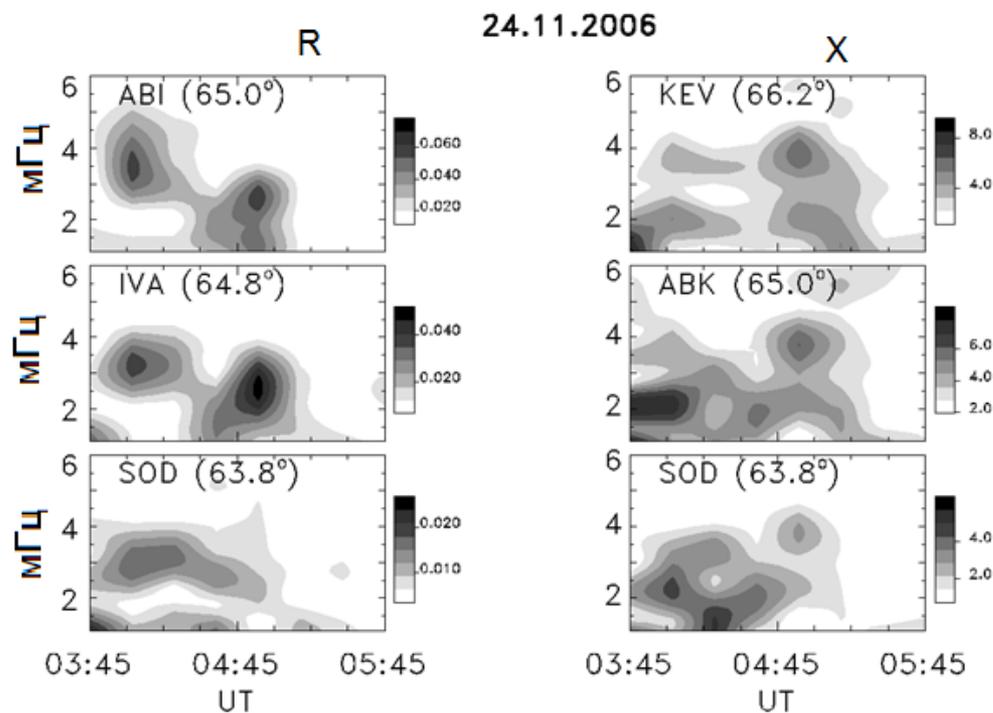
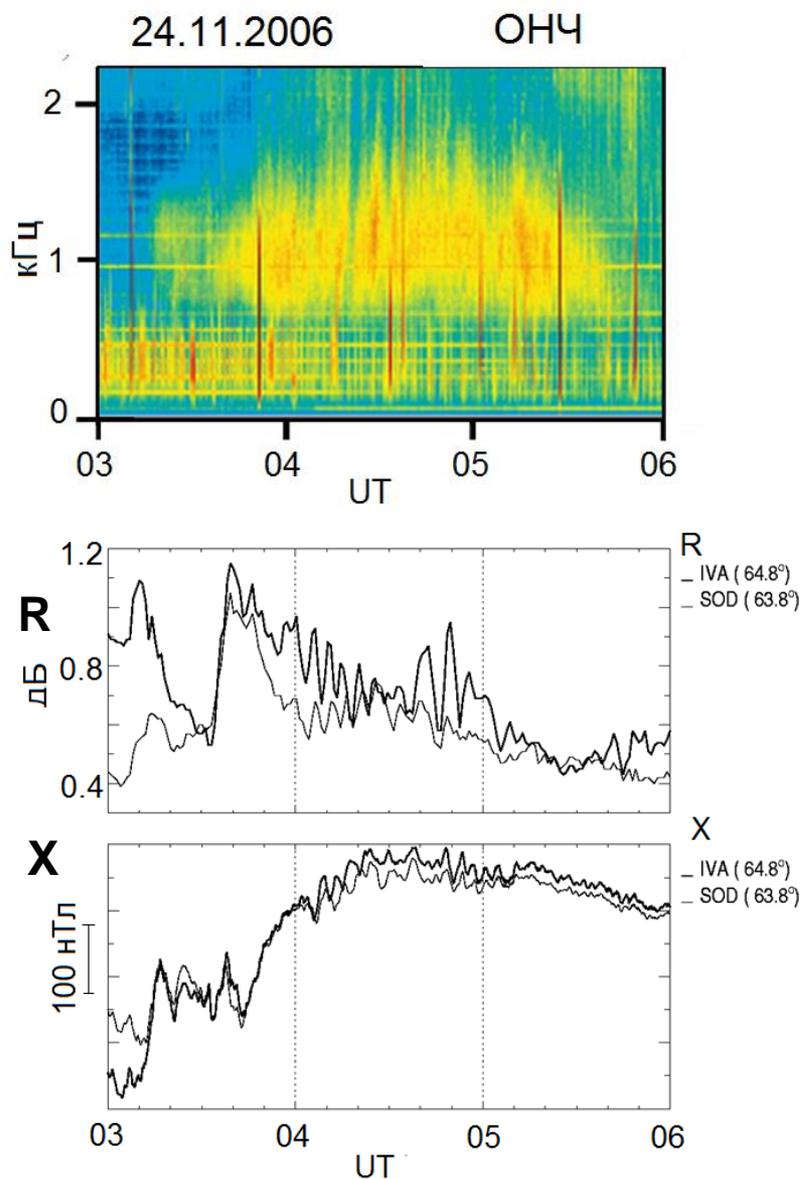
22:13 - 22:23

Было выявлено, что спорадические высыпания электронов вблизи **полярной границы аврорального овала** сопровождались бухтообразными магнитными возмущениями, всплесками риометрического поглощения, геомагнитными P₁₃ пульсациями и полярными сияниями.



Этот эксперимент показал наличие спорадических возмущений даже в **магнитоспокойные** периоды на полюсной границе аврорального овала

Рс5 геомагнитные пульсации, пульсирующие высыпания частиц и ОНЧ хоры



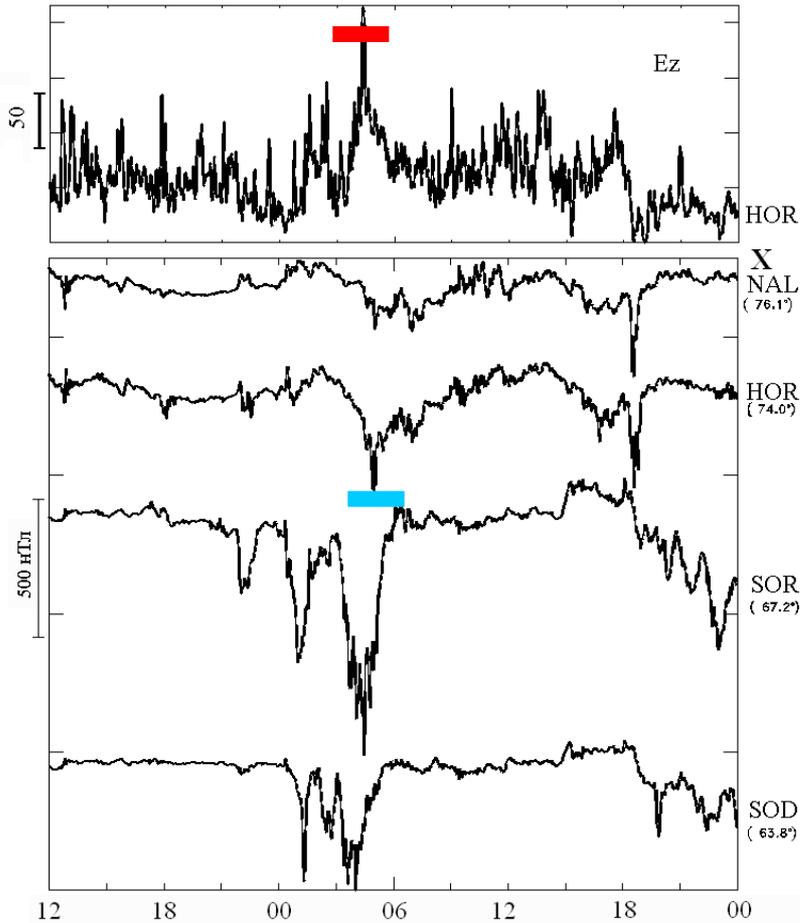
Показано, что Рс5 геомагнитные пульсации могут модулировать высыпание электронов и интенсивность ОНЧ хоры.

Положение 3. УНЧ волны могут вызывать модуляцию потоков захваченных и высыпающихся энергичных магнитосферных электронов и ускорять их до релятивистских энергий, при этом флуктуирующие потоки высыпающихся электронов приводят к модификации E-слоя ионосферы и генерации геомагнитных колебаний.

- Показано, что всплески Pc5/Pi3 пульсаций локальны во времени и пространстве. Они совпадают с началом суббури и привязаны к области вытекающих из ионосферы продольных токов.
- Во время суббури в утренние часы в авроральных широтах пульсирующие высыпания электронов синхронны с геомагнитными Pc5 пульсациями только на частотах $f > 2$ МГц. Возможной причиной этого является особенность модуляции коэффициента питч-угловой диффузии электронов альвеновскими волнами.
- Спорадические высыпания энергичных электронов ($E > 300$ кэВ) по данным спутника КОРОНАС-Ф, бухтообразные магнитные возмущения, всплески риометрического поглощения, геомагнитные Pi3 пульсации, и уярчения полярных сияний постоянно присущи полярной границе аврорального овала.
- Pc5 геомагнитные пульсации модулируют высыпание электронов и интенсивность ОНЧ хоров.

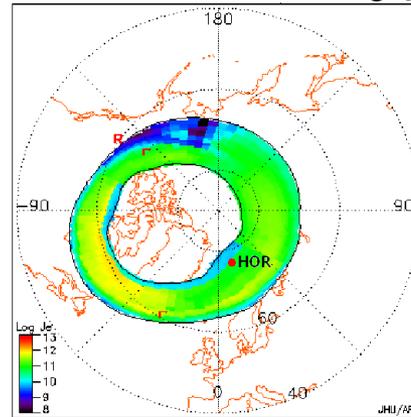
Возмущения атмосферного электрического поля и начало суббури

03-04.09.2006



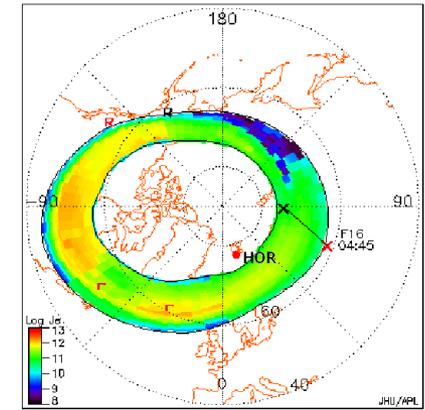
суббури

01 - 02 UT

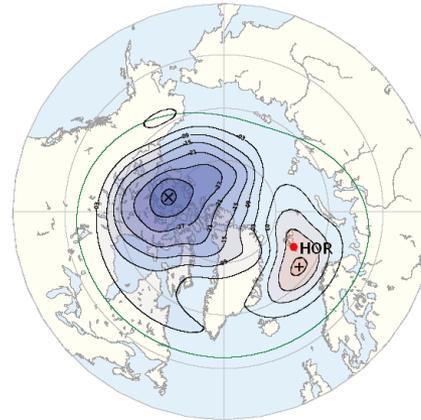


04.09.2006

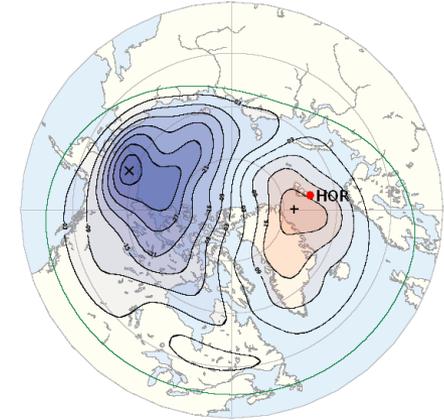
04 - 05 UT



01.30 - 01.32 UT



04.10 - 04.12 UT



Развитие магнитосферной суббури в утреннем секторе сопровождается положительными отклонениями в E_z , при этом точка наблюдения (станция HOR) находилась вблизи центра утреннего (положительного) вихря конвекции.

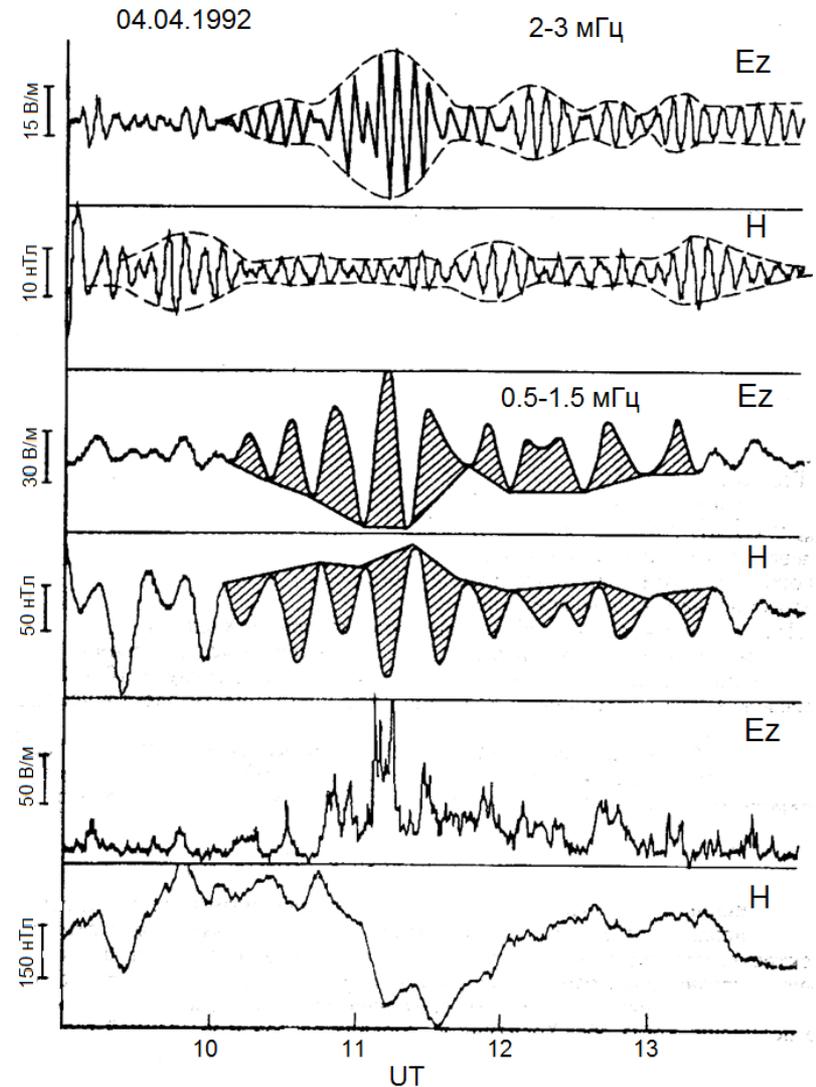
В вечернем секторе, когда станция HOR попадала в область вечернего (отрицательного) конвективного вихря, развитие полярной суббури сопровождалось отрицательными отклонениями в E_z .

Взаимосвязь между возмущениями геомагнитного поля и вариациями атмосферного электрического поля в полярных широтах

На широтах полярного каспа в спектрах вариаций E_z и геомагнитного поля выделяется широкий максимум в диапазоне 1-5 мГц.

Показано, что длиннопериодные геомагнитные пульсации (10-30 мин) находятся в противофазе с электрическими вариациями, в то время как короткопериодные пульсации не сопровождаются синхронными колебаниями E_z .

Результат подтвержден на большом статистическом материале



Положение 4. Высокоширотные УНЧ колебания являются агентом, осуществляющим связь между геомагнитными возмущениями и атмосферным электричеством.

Показано, что длиннопериодные геомагнитные пульсации (10-30 мин) находятся в противофазе с электрическими вариациями, в то время как короткопериодные пульсации не сопровождаются синхронными колебаниями E_z .

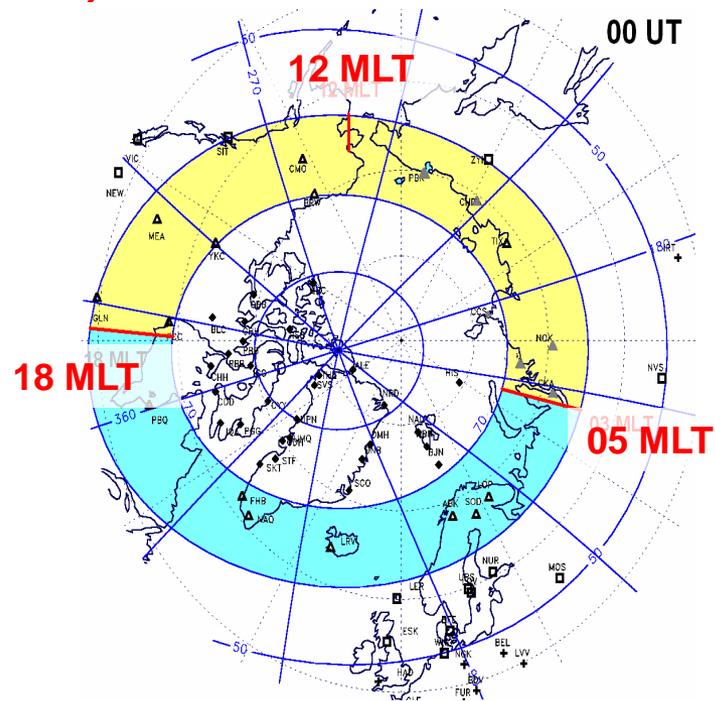
Развитие суббури сопровождается положительными/отрицательными отклонениями в атмосферном электрическом поле E_z , когда пункт наблюдения находится вблизи центра утреннего/вечернего вихря ионосферной конвекции. Конвективное движение ионосферной плазмы отражается в вариациях атмосферного электрического поля.

5. Разработка индексов волновой активности (УНЧ-индексы)

Для оценки глобального уровня волновой УНЧ активности в магнитосфере предложен новый индекс, характеризующий мощность пульсаций в Pc5-диапазоне и рассчитываемый по данным глобальной сети магнитометров северного полушария.

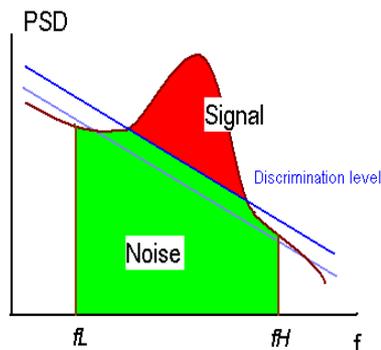
Текущее среднечасовое значение наземного УНЧ-индекса определяется как максимальная мощность:

- в полосе частот Pc5: 2-7 мГц
- в дневном секторе: 05–18 MLT
- на геомагнитных широтах 60°-70°



$$Tgr = \log \left(\frac{1}{N_s} \sum_{js=1}^{N_s} AT_{js} \right)$$

N_s – число станций



Общая спектральная мощность:

$$T = \int_{fL}^{fH} F(f) df$$

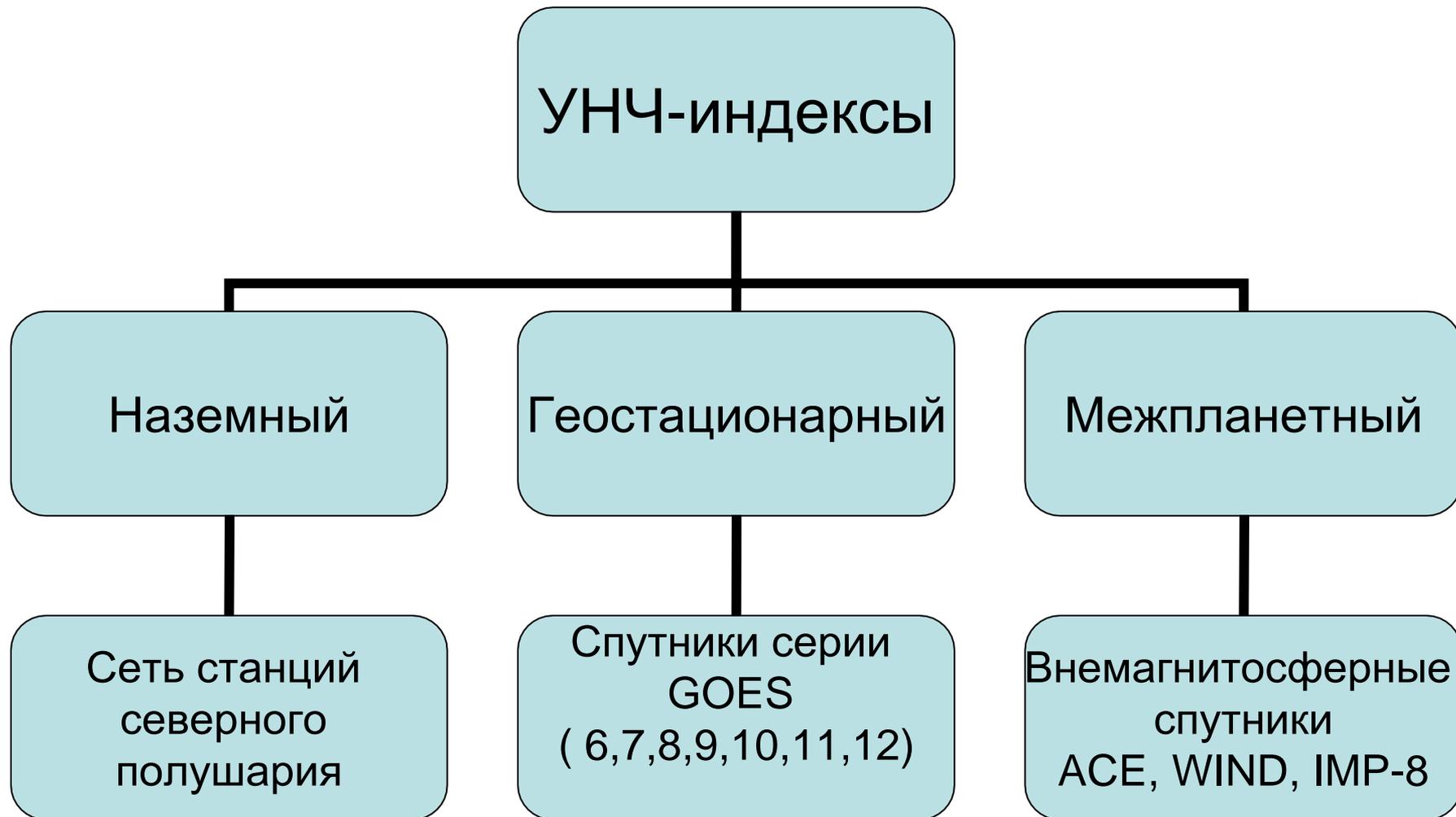
Сигнал:

$$S = \int_{fL}^{fH} \{F(f) - F_N(f)\} df$$

УНЧ-индексы

Подобным образом вводятся **межпланетный** УНЧ-индекс, характеризующий волновую активность в солнечном ветре, и **геостационарный** УНЧ-индекс, характеризующий волновую активность в магнитосфере.

Таким образом, имеем следующий набор индексов:



Применение УНЧ-индексов

Ускорение магнитосферных электронов при взаимодействии с УНЧ-волнами.

[Kozyreva et al., *Planet. Space Science*, 2007;
Romanova and Pilipenko, *Acta Geophysica*, 2008;
Мягкова и др., *Астрономический вестник*, 2013]

Исследование ULF волн в магнитосфере.

[Simms et al., *JGR*, 2010]

Исследование электрических полей

[Kim et al., *JGR*, 2011]

Статистические исследования поведения УНЧ-волн

[Козырева и Клейменова, *Геомагнетизм и аэрономия*, 2008, 2009, 2010]

Гелиобиология

[Зенченко, *Геофизические процессы и биосфера*, 2010]

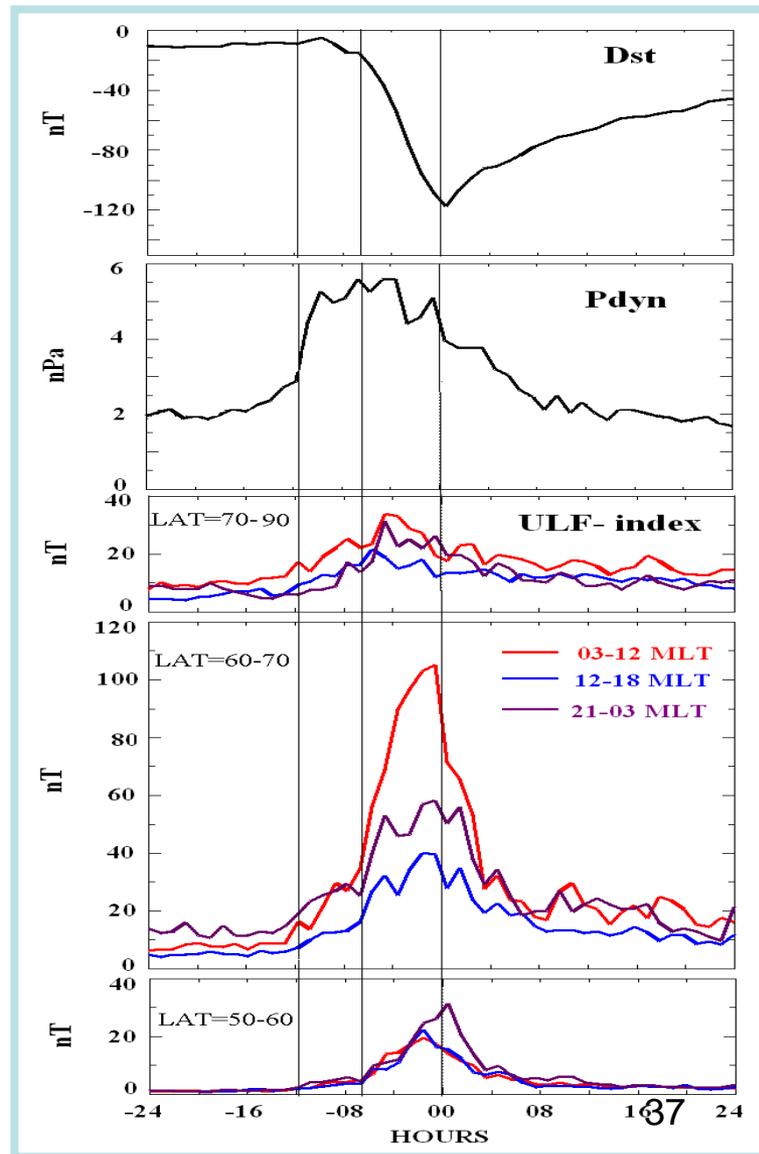
Статистические свойства УНЧ активности во время сильных магнитных бурь

Сильные бури: $-150 < \text{Dst}_{\min} < -100$ нТл

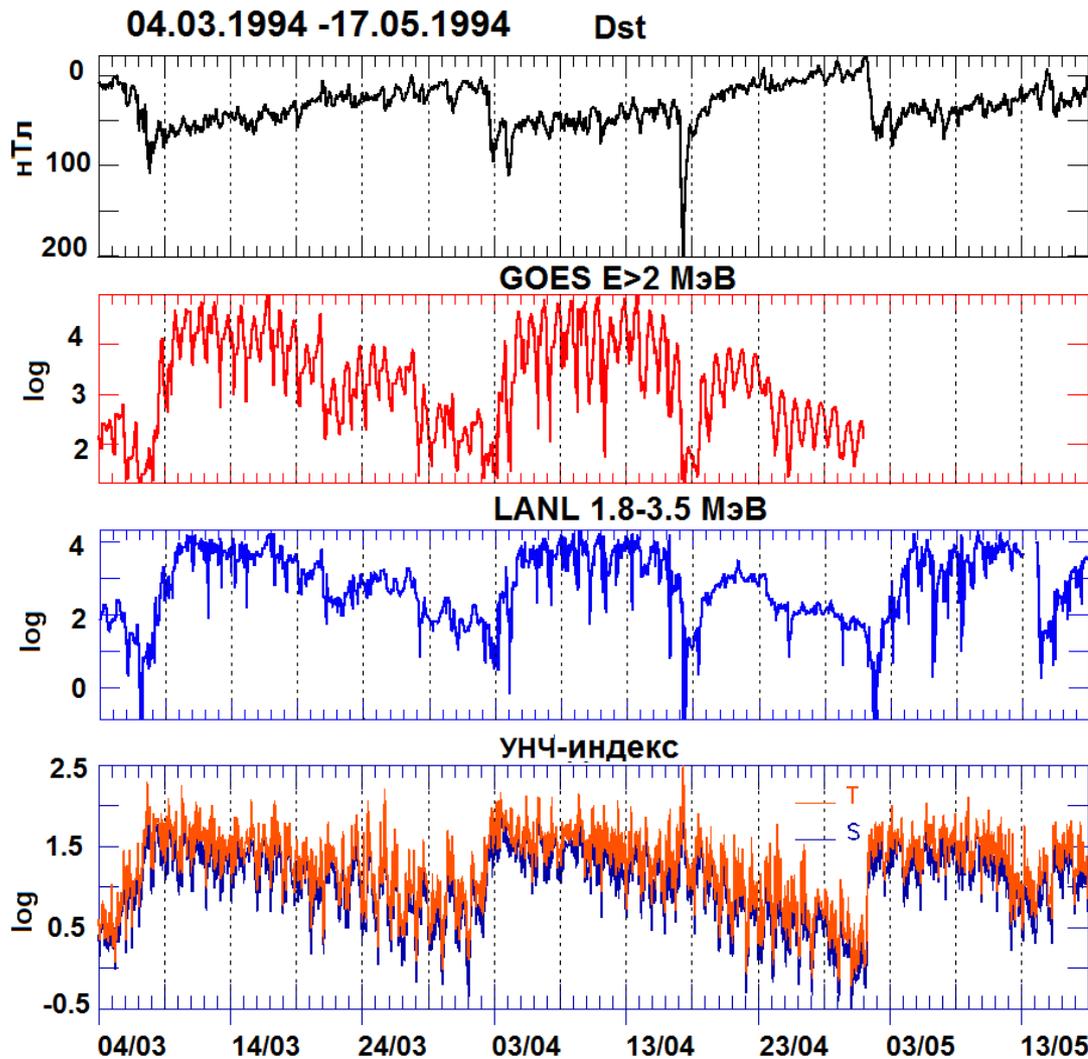
Наибольшая интенсивность УНЧ пульсаций в начальную фазу магнитной бури отмечается в полярных широтах в утреннем секторе, а в авроральных широтах - в ночном и утреннем.

В главную фазу магнитной бури наибольшая волновая активность наблюдается в утреннем секторе авроральной зоны.

В восстановительную фазу бури волновая активность наибольшая в авроральной зоне в утреннем и ночном секторах, ночная активность отмечается и в субавроральной зоне.



УНЧ-активность и ускорение электронов в магнитосфере



Показано, что УНЧ-индекс лучше, чем какой-либо из существующих геомагнитных индексов, характеризует динамику релятивистских электронов в магнитосфере.

Положение 5. Геомагнитный волновой индекс, характеризующий уровень УНЧ волновой активности в околоземном пространстве, является важной характеристикой космической погоды.

- Разработан новый геомагнитный индекс (УНЧ-индекс), характеризующий уровень ультранизкочастотной волновой активности на земной поверхности, в магнитосфере Земли и в межпланетном пространстве.
- УНЧ индекс оказался эффективным параметром для статистического анализа различных процессов в солнечно-земной физике: определения различий в отклике магнитосферы на разные типы магнитных бурь, волнового ускорения релятивистских электронов и др.

Основные результаты работы

- Разработан новый геомагнитный индекс (УНЧ-индекс), характеризующий уровень ультранизкочастотной волновой активности на земной поверхности, в магнитосфере Земли и в межпланетном пространстве.
- Обнаружен качественно новый класс геомагнитных пульсаций - глобальные Pc5 пульсации.
 - Выявлены эффекты контроля магнитосферных пульсаций нестационарными процессами в солнечном ветре.
- Обнаружен эффект резкого подавления дневных длиннопериодных колебаний в каспе во время начала суббури на ночной стороне.
- Обнаружена северо-южная асимметрия в поведении длиннопериодных пульсаций в высоких широтах.
- По наземным и спутниковым данным показана связь авроральных геомагнитных Pc5-6 и Pi2-3 пульсаций с пульсирующими высыпаниями электронов, возмущениями ионосферного электроджета, и полярными сияниями.
- Показано, что длиннопериодные геомагнитные пульсации находятся в противофазе с вариациями вертикальной компоненты атмосферного электрического поля.
- Разработан специализированный пакет программ для анализа данных наземных и спутниковых магнитометров, включающий оригинальные методы спектральной оценки, расчет распределения спектральной мощности УНЧ волн и построения диаграмм мощности.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!