

## 6.3 ВОЗМУЩЕННАЯ МАГНИТОСФЕРА

### Оглавление

#### ВВЕДЕНИЕ

##### 6.3.1. АВРОРАЛЬНАЯ РАДИАЦИЯ

###### **6.3.1.1. Определения.**

###### **6.3.1.2. Границы авроральной магнитосферы**

###### **6.3.1.3. Характеристики авроральных частиц**

###### **6.3.1.4. Инжекция (ускорение) авроральных электронов и ионов**

###### **6.3.1.5. Высыпание энергичных авроральных частиц в атмосферу.**

##### 6.3.2. ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

###### **6.3.2.1. Морфология и классификация полярных сияний.**

###### **6.3.2.2. Пульсации полярных сияний**

##### 6.3.3. МАГНИТОСФЕРНЫЕ СУББУРИ

###### **6.3.3.1. Определения**

###### **6.3.3.2. Структура изолированной суббури.**

###### **6.3.3.3. Взрывная неустойчивость суббури**

###### **6.3.3.4. Суббурия во внешней магнитосфере**

###### **6.3.3.5. Связь с солнечным ветром. Энергетическая схема суббури.**

#### ВВЕДЕНИЕ

Магнитосфера редко бывает спокойной. Возмущения вносят существенные изменения в структуру магнитосферы. Сам процесс перестройки магнитосферы, локальный или крупномасштабный, является существенным если не основным фактором возмущенной магнитосферы.

Возмущения делятся на три типа:

- полярные перманентные возмущения,
- суббуревая активность,
- магнитные бури.

Первый тип наблюдается во внешней магнитосфере и, соответственно, в полярной шапке, второй тип захватывает и зону квазизахвата, авроральную магнитосферу, и, наконец, магнитные бури вызывают существенные процессы и во внутренней магнитосфере, в радиационных поясах.

Величина возмущения оценивается индексами магнитной возмущенности. Кр-индекс (трехчасовой, суточный) оценивает возмущенность в целом. Индекс Dst характеризует развитие магнитных бурь, кольцевого тока, Ае-индексы (минутные, среднечасовые) описывают суббуревую активности и РС-индекс относится к возмущениям в полярной шапке. Все эти индексы отражают, через изменения магнитного поля, состояние ионосферных и магнитосферных токов, которые, в свою очередь, зависят от структуры электрических полей и потоков частиц, авроральной радиации.

В первом разделе основное внимание уделяется авроральной радиации, во втором - полярным сияниям и в третьем магнитосферным суббуриям. Хотя магнитосферные возмущения охватывают все области магнитосферы, однако для аврорально-суббуревых процессов главной ареной является ночная зона квазизахвата, а в проекции на границу атмосферы - зона активных полярных сияний, кольцо/овал Хорошевой/ Фельдштейна/ Старкова.

Магнитные бури рассматриваются отдельно.

### 6.3.1. АВРОРАЛЬНАЯ РАДИАЦИЯ

#### 6.3.1.1. Определения.

В классификации потоков частиц, населяющих магнитосферу Земли, **авроральная радиация (АР)** занимает промежуточное положение между потоками плазмы и захваченной радиацией. Энергетический диапазон АР - от единиц до сотен кэВ. В верхней части диапазона АР существенно перекрывается с захваченной радиацией радиационных поясов, четкого разграничения вообще нет, и главным критерием отождествления АР является ее изменчивость, ограниченное время существования. В спокойные периоды АР отсутствует.

Как видно из названия, к авроральной радиации относятся потоки частиц, прямо или косвенно связанные с **полярными сияниями** (аурога). Так как полярные сияния наблюдаются не только в зоне сияний, но и в полярной шапке и в субавроральной зоне, а иногда и в средних широтах, ясно, что такое широкое толкование не позволяет отвести для авроральной радиации какую-либо одну очерченную область в магнитосфере. И действительно, спорадические потоки энергичных электронов и ионов регистрируются в магнитосфере практически повсюду. Следует, однако, выделить две области - **авроральную магнитосферу**, главную область обитания АР, расположенную в пределах **области квазизахвата (ОКЗ)** и **магнитосферный хвост (МХ)**, где потоки энергичных частиц появляются эпизодически, на короткое время.

Авроральная радиация появляется во время **магнитосферных суббурь**, причем на разных стадиях, фазах суббури действует несколько механизмов ускорения частиц, поэтому авроральную радиацию следует разделять на несколько типов по происхождению, характеру временных вариаций и энергетическому спектру. В 60-70 годы предлагалось много вариантов такого деления и различная терминология, в основном на базе измерений на низковысотных спутниках и ракетах. Чаще всего принято делить АР на два диапазона по энергии - *мягкая или низкоэнергичная АР до 10 - 20 кэВ и жесткая или энергичная АР от 10 - 20 кэВ до нескольких сот кэВ*. Этого деления мы и будем придерживаться при последующем изложении. Мягкая компонента также может быть разделена на несколько типов по энергии и области обитания. Плазма центрального плазменного слоя, **ЦПС, (Central Plasma Sheet)** внутри ОКЗ существенно энергичнее плазмы граничного слоя (**Boundary Plasma Sheet**).

Здесь и далее в этом разделе речь идет о энергичной компоненте, мягкая компонента АР будет рассмотрена в разделе по полярным сияниям.

Из всего ряда вариаций АР во время суббури можно выделить быстрый одновременный рост потоков электронов и ионов, т.н. **инжекцию**,

которая совпадает с началом активной фазы суббури и взрывной вспышкой полярных сияний (*breakup, substorm onset*), и предшествующий спад потока частиц в области квазизахвата, связанный с перестройкой магнитосферной ловушки, с вытягиванием в хвост магнитных стловых линий. Глубокий спад до фона ГКЛ свидетельствует о том, что граница ОКЗ уходит ближе к Земле и спутник оказывается в хвосте, такие события называют **дропаутами (dropouts)**. Переполнение магнитосферной ловушки приводит к **высыпанию частиц** в атмосферу, этот процесс заслуживает специального рассмотрения, т.к. с ним связаны и полярные сияния, и возмущения в ионосфере, и **тормозное рентгеновское излучение (auroral X-rays)**. Высыпание частиц, особенно электронов, не является монотонным, наблюдаются вариации с характерными временами от долей секунды до десятков минут и множество типов пульсаций, исследованию которых посвящен специальный раздел данной работы.

### 6.3.1.2. Границы авроральной магнитосферы.

Конфигурация магнитосферы представлена на рисунке 1 схемой О'Брайена, в которой мы добавили границу между ОКЗ и плазменным слоем ХМ.

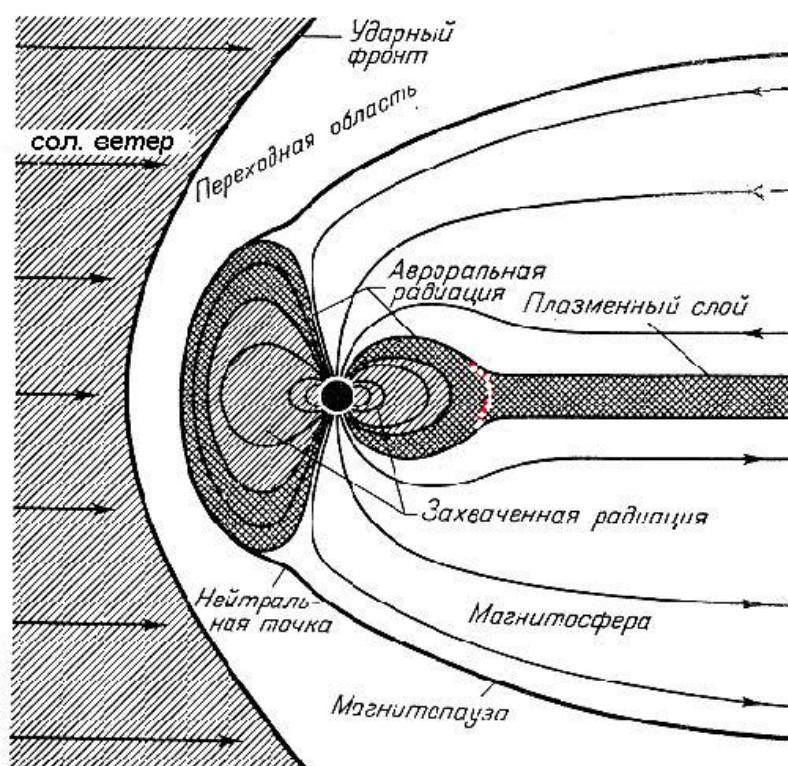


Рис 1 Схема основных областей и границ магнитосферы Земли.

Область, в которой возникает и сохраняется на некоторое время поток свежееускоренных частиц, **авроральная магитосфера**, находится внутри ОКЗ, но ее мгновенные и среднестатистические границы не совпадают с границами ОКЗ, так как определяются не только конфигурацией магнитного поля, но и величиной и глубиной проникновения крупномасштабного электрического поля конвекции и динамикой суббурового процесса в целом.

Рис 2 представляет проекцию магнитосферных областей на границу атмосферы. Размеры кольца полярных сияний меняются, положение тонкого кольца в спокойное время и приполюсной границы во время возмущений соответствует границе между ОКЗ и граничным ПС.

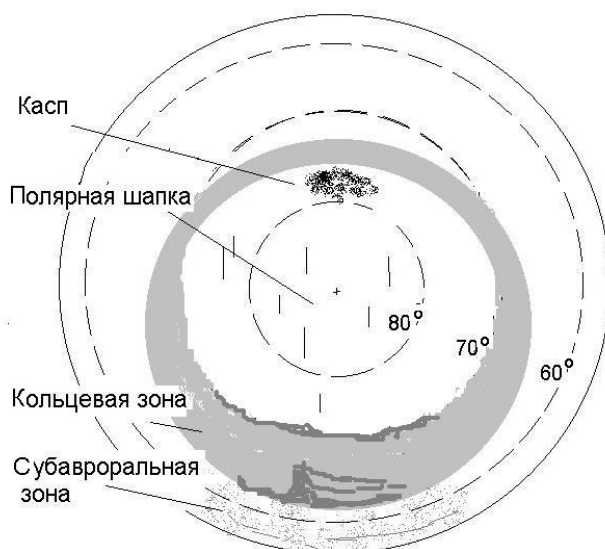


Рис 2. Проекция областей магнитосферы на границу атмосферы.

**Область квазизахвата.** Между радиационным поясом и хвостом магнитосферы расположена область неустойчивой радиации или квазизахвата. Граница устойчивого захвата не является резкой даже для частиц одного сорта, энергии и питч-угла. Благодаря питч-угловой и радиальной диффузии граница размывается, и склон внешнего радиационного пояса растягивается на несколько земных радиусов. В результате переход к области квазизахвата получается плавным, происходит перекрытие, и в любой точки зоны квазизахвата можно обнаружить и частицы радиационного пояса, и свежееускоренные частицы авроральной радиации или кольцевого тока.

Надо сказать, что этой важной для возмущенного времени области в некоторых схемах вообще нет или она объединена с хвостовой частью плазменного слоя. Во многих работах применяется несколько безликие обозначения - внутренняя магнитосфера, геостационарная область, околоземная часть плазменного слоя. Название "Авроральная магнитосфера", отражающее сопряженность этой области с авроральной зоной, не получило распространения. Мы будем здесь использовать термин зона квазизахвата, как отражающий главные особенности структуры магнитного поля и движения частиц: несмотря на умеренную или сильную диффузию, на несохранение адиабатических инвариантов, энергичные частицы здесь захвачены, сохраняют три компоненты движения- ларморовское вращение, осцилляции вдоль силовой линии и магнитный дрейф, хотя и не замкнутый вокруг Земли.

Внутренняя граница ОКЗ определяется экспериментально по сдвигу экваториальной границы активных полярных сияний и по глубине проникновения в магнитосферу космических лучей (протонов) солнечного происхождения. Зависимость положения границ овала полярных сияний от

уровня магнитной активности была исследована в работах Старкова и Фельдштейна ( ); один из их графиков приводится на рисунке 3. Зависимость движения границы проникновения СКЛ от мощности магнитной бури ( Dst) исследовалась в работах Тверской и Кузнецова ( ), на рис 4 воспроизведен график движения границы во время серии магнитных бурь в октябре 2003г.

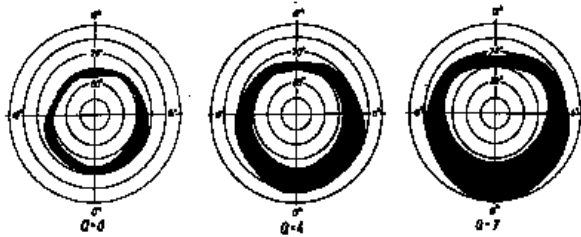


Рис 3 Форма овала полярных сияний в зависимости от уровня магнитной активности (Старков, 2002)

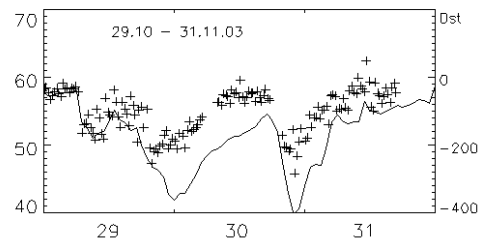


Рис 4. Динамика границы проникновения СКЛ (магнитная широта) и Dst-индекс магнитной активности.

Внешняя граница ОКЗ в проекции на высокоширотную атмосферу совпадает с границей полярной шапки, а в плоскости экватора - с фоновой границей радиационного пояса. Эта граница в возмущенной магнитосфере может быть крутой, одновременной для всех частиц в широком диапазоне энергий, и динамичной, движущейся к Земле и от Земли на подготовительной и активной фазах суббури соответственно. Рисунок 5 иллюстрирует вышесказанное - поток частиц на геостационарной орбите падает на подготовительной фазе (дропаут) и резко растет в начале активной фазы вследствие диполизации магнитного поля.

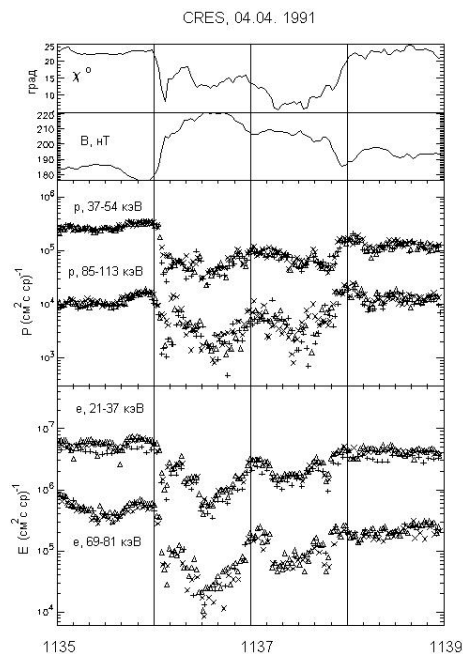


Рис 5. Эффект дропаута в магнитном поле (вытягивание силовых линий) и в потоках энергичных частиц – падение интенсивности при входе в дропаут и возрастание при возврате в ОКЗ.

В спокойное время граница зоны сияний и, соответственно граница ОКЗ и хвоста магнитосферы находятся в районе  $71^\circ$  геомагнитной широты. В некоторых случаях, однако, она может сдвигаться гораздо ближе к полюсу, т.е. область квазизахвата аномально расширена. Существование суббури в полярной шапке отмечалось в ряде работ ( ). Объяснение этого эффекта как процесса гипердиполизации, когда в процессе экспансии суббури спокойная грань диполизации проскакивается и дополнительная интенсификация суббури наблюдается уже в традиционных пределах полярной шапки, вплоть до  $80-85^\circ$ , было дано в ( ) в результате анализа суббурь и измерений всплесков электронов  $0.5$  МэВ на спутнике Коронас-И. На рис. 6 приведены кеогаммы полярных сияний по наблюдениям на авроральной станции Ловозеро и высокоширотной обсерватории Баренцбург из работы Корниловой и др. (2005), где этот эффект отчетливо виден.

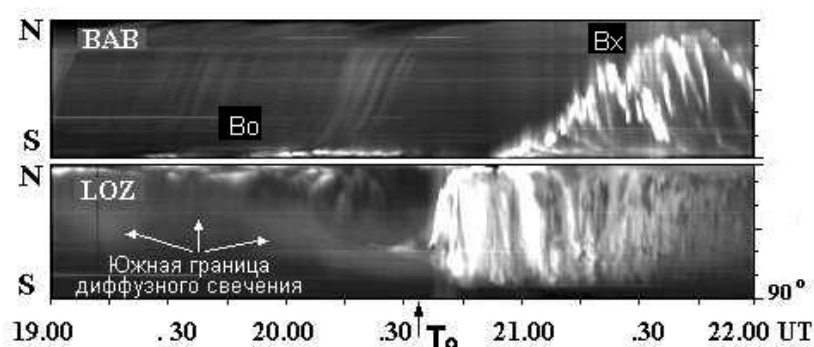


Рис. 6. Кеогаммы полярных сияний, станции Баренцбург и Ловозеро. Суббуря в полярной шапке начинается после обычной суббури с быстрой экспансией.  $B_0$  – обычное положение границы полярная шапка/ОКЗ,  $B_x$  – аномальная граница. ( ).

Следует добавить, что представление о конфигурации полярной шапки в виде круга или эллипса далеко от действительности. Поскольку азимутальный размер области суббуревой активности порядка  $15-40$  градусов, такой же размер глубоких выпуклостей или вогнутостей границы.

### 6.3.1.3. Характеристики авроральных частиц.

На рис. 7 приведены три кривые энергетического спектра авроральных протонов в диапазоне от  $100$  эВ до  $500$  кэВ на подготовительной фазе суббури, измеренные на спутнике CRRES вблизи плоскости экватора на ночной стороне на  $6.5$  Re. Три энергетических области, три популяции протонов можно выделить: низкоэнергичные  $0.1-5$  кэВ, большая изменчивость которых указывает на ионосферное происхождение, энергичные, выше  $50-70$  кэВ и промежуточные, по обе стороны от максимума спектральной кривой. Временные вариации, механизмы ускорения и роль в развитии возмущений этих популяций протонов (или точнее, ионов) разные, их роль в аккумуляции энергии в возмущенной магнитосфере, в развитии токовых систем, в создании неравновесной пространственной неоднородности плазменного давления несомненно велики, но еще далеко не всегда понятны. К энергетическому спектру электронов применимо аналогичное разделение (см. ниже в разделе 6.3.1.4).

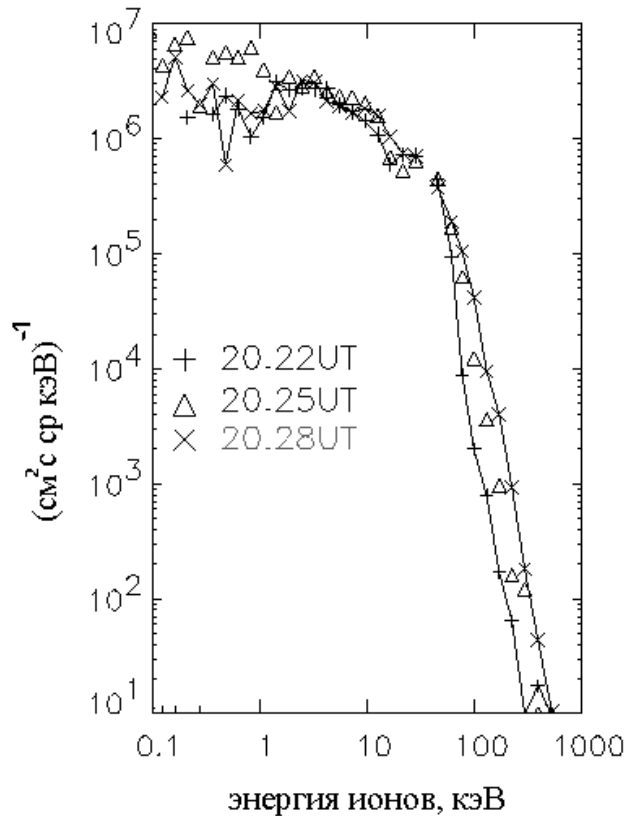


Рис 7. Энергетический спектр протонов.

**Низкоэнергичная** компонента авроральной радиации имеет наименование центральный плазменный слой (ЦПС) в отличие от хвостовой, граничной и более холодной части плазменного слоя. ЦПС пополняется из двух источников - из солнечного ветра путем конвекции из хвоста магнитосферы и из ионосферы. Первый источник более медленный и имеет глобальный характер, второй - быстрый и локализованный в пространстве. Продольные токи в авроральной магнитосфере возникают всюду, где есть градиент плотности плазмы; там же отмечаются и свежеускоренные электроны и ионы. Ускорение частиц приписывается как продольным электрическим полям, так и взаимодействию с волновыми структурами. Ракетные и спутниковые измерения энергетического спектра, пичч-углового распределения и временных характеристик потоков низкоэнергичных электронов и ионов демонстрируют значительное разнообразие типовых структур, пока еще не укладывающееся в стройную классификационную систему. Отметим существование двух групп, первая связана с активными формами полярных сияний и суббуревыми активизациями, вторая ассоциируется со спокойными дугами сияний; к этой второй группе относятся потоки частиц типа "перевернутого V".

Динамика **энергичных авроральных** частиц в принципе не отличается от частиц радиационного пояса. В движении частиц присутствуют все три компоненты - циклотронное вращение, скачки вдоль силовых линий и азимутальный дрейф. Отличие заключается в том, что адиабатические инварианты не сохраняются из-за того, что магнитное поле ловушки меняется за время сравнимое с периодами дрейфа, скачка (пульсации) и ларморовского вращения (ОНЧ-излучения). Все же в некоторых случаях мы видим свидетельство полного дрейфа вокруг Земли, так называемое "дрейфовое эхо" -

на место инъекции возвращаются сначала электроны самых больших энергий, затем с задержкой - все остальные.

По сути дела мы можем говорить о наличии АР только из-за заметного переполнения ловушки в данном месте. Облако частиц, ускоренных в полуночном секторе дрейфует вокруг Земли, оставляя след в ионосфере. Поток частиц за время дрейфа существенно снижается - часть высыпается в атмосферу, часть рассеивается и через 1-2 оборота отличить частицы АР от частиц радиационного пояса уже невозможно.

#### 6.3.1.4. Инжекция (ускорение) авроральных электронов и ионов

Быстрое возрастание потока энергичных электронов и ионов наблюдается в момент начала активной фазы суббури или одной из последующих активизаций.

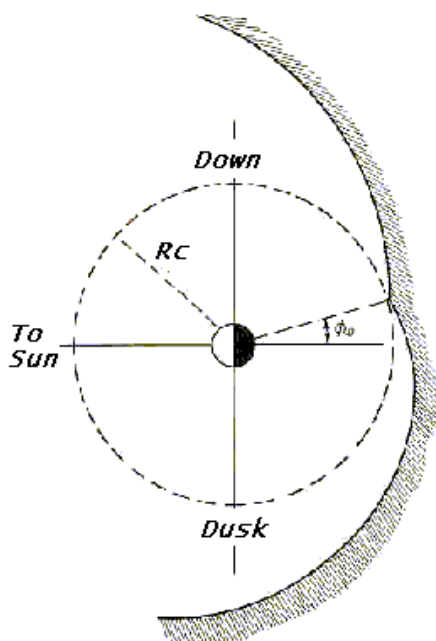
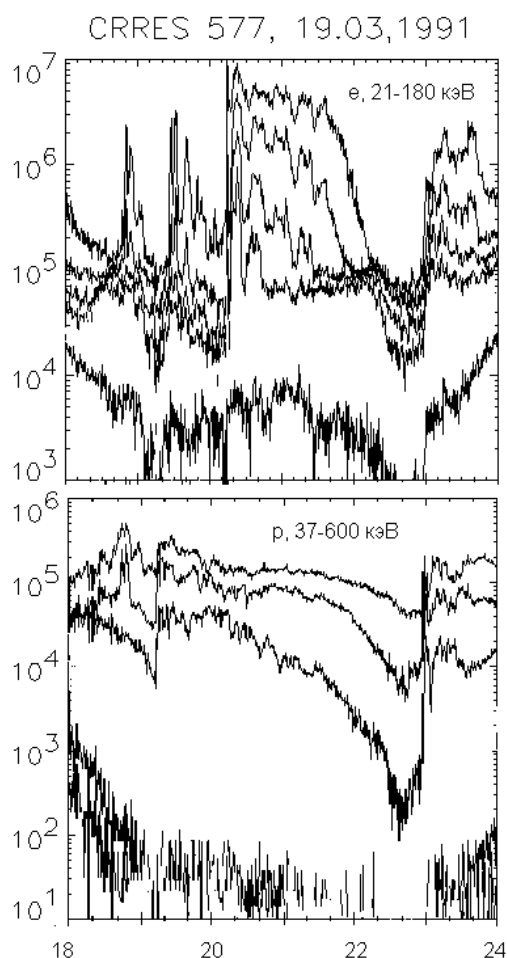


Рис 8 Границы инъекции МакИлвайна

Рис 9. Энергичные электроны и ионы на спутнике CRRES. Бездисперсионные инъекции в 1917 и 2247 UT, вход в дропаут в 2230 UT.



МакИлвайн разделил наблюдавшиеся случаи инъекции на бездисперсионные, когда электроны и протоны всех энергий возрастают одновременно и возрастания с дисперсией. Во втором случае временная задержка росла с уменьшением энергии частиц, что указывало на магнитный дрейф из области ускорения. Бездисперсионные инъекции располагались в ОКЗ и ближе всего к Земле вблизи полуночи и при дольшом уровне активности. На рис 8 приведена схема положения границ инъекции МакИлвайна.



**Электроны.** На рис 9 приведены радиальные профили энергичных электронов (30-300 кэВ) и ионов, измеренные спутником CRRES на периферии внешнего радиационного пояса. Спутник летал в плоскости экватора по вытянутой квазигеостационарной орбите и по несколько часов в каждом обороте проводил в авроральной магнитосфере. Авроральную радиацию на легко отделить от захваченной радиации по характеру временных вариаций. Вместе с тем, энергетический диапазон их существенно перекрывается.

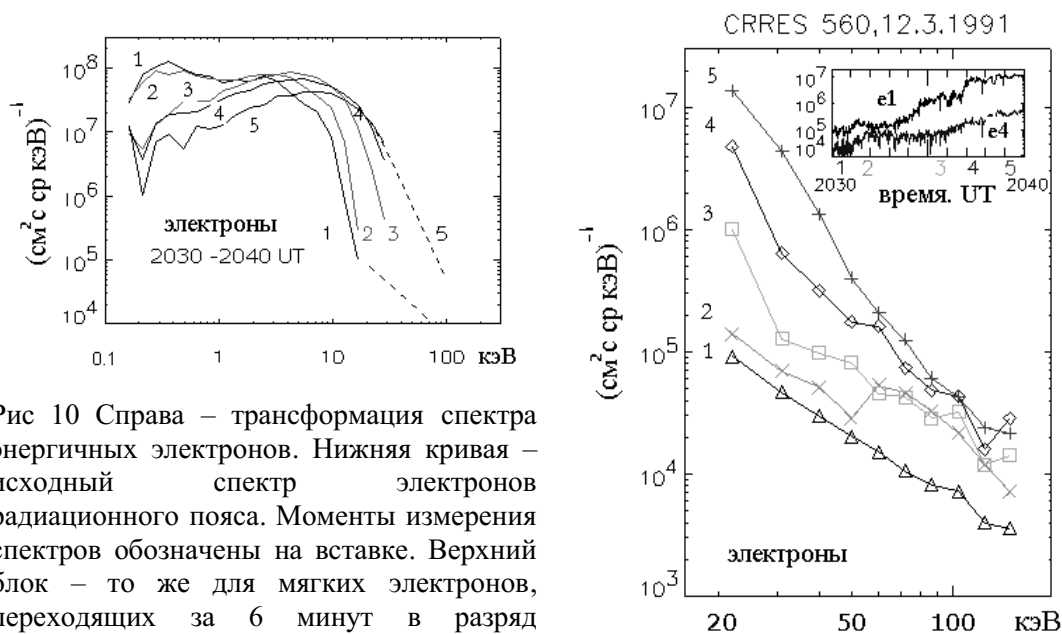


Рис 10 Справа – трансформация спектра энергичных электронов. Нижняя кривая – исходный спектр электронов радиационного пояса. Моменты измерения спектров обозначены на вставке. Верхний блок – то же для мягких электронов, переходящих за 6 минут в разряд энергичных авроральных электронов.

Рис 10 иллюстрирует динамику спектра авроральных электронов во время инъекции. Рост интенсивности частиц с энергией 10-70 кэВ определяется бетатронным ускорением электронов центрального плазменного слоя. Возрастание, зарегистрированное в более энергичных каналах объясняется за счет радиального смещения траекторий магнитного дрейфа в связи с локальной диполизацией магнитного поля. Этот процесс имеет обратимый характер, ускорения не происходит.

Рассмотренный крупномасштабный ускорительный процесс дополняется локальными импульсными ускорениями во время многочисленных суббуревых активизаций, что создает в результате сложную и неповторимую картину динамики авроральных частиц. Термин инъекция в результате теряет смысл, потому что взрывная неустойчивость суббури развивается в области квазизахвата, и в ускорении частиц, как электронов, так и ионов радиальный перенос частиц носит характер ограниченного смещения внутри ОКЗ.

**Ионы.** До недавнего времени предполагалось, что инъекция протонов и электронов происходит одновременно и обусловлена единым механизмом – радиальным переносом частиц из области развития суббуревой неустойчивости. Последние исследования показывают, что инъекция протонов и электронов - это два разных процесса, не совпадающих во времени, причем всплеск протонов наблюдается раньше электронного. Задержка лежит в пределах от нескольких секунд до 1-2 минут. Чтобы это заметить в конкретных суббурях, нужно чтобы инструменты позволяли получить достаточно хорошее временное разрешение (секунды) и чтобы спутник оказался вблизи локальной активизации. На рис 11 и

12 приведены два примера из работы ( ), на которых видно, что ионы появляются раньше возрастания электронов и диполизации магнитного поля.

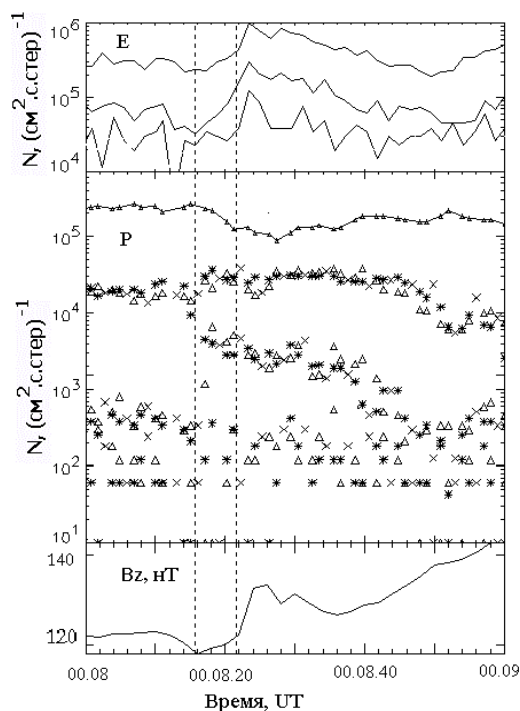


Рис 11 Суббуравая активизация по измерениям на спутнике CRRES 15.01.1991г. Сверху вниз: электроны, энергии 40-100 кэВ, ионы, каналы 37-54, 113-147, 147-193 и 254-365 кэВ и Bz компонента магнитного поля.

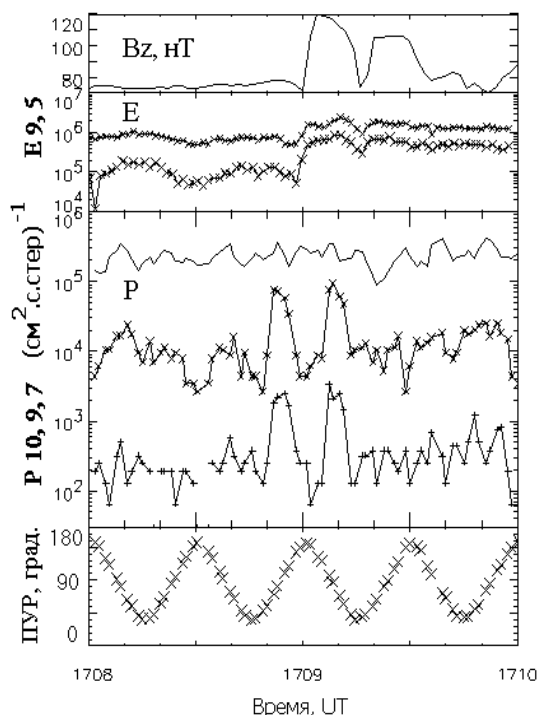


Рис 12. То же, что на рис 11, 24.01.91г. каналы 59-69 и 112-130 кэВ для электронов и 193-254, 335-447 и 447-602 для ионов. Внизу – питч-углы поля зрения ионного детектора, модуляция потока ионов связана с вращением детектора.

Большая часть эффектов суббури, привлекающих внимание исследователей, связана с авроральными электронами. Ускоренные авроральные электроны создают большую часть ярких эффектов сияний, высыпание электронов создает ионосферные эффекты, поглощение радиоволн, электроджет и магнитные возмущения, всплески ОНЧ, пульсации и пр.

Роль ионов в развитии суббуравых возмущений менее заметна, но не менее важна. Электроны вморожены в магнитное поле и не могут существенно изменить его конфигурацию, тогда как ионы как основные носители тока в авроральной магнитосфере ответственны за изменения ее конфигурации. Анизотропия плазменного давления контролирует продольные токи, рост плазменного параметра  $\beta > 1$  приводит к дестабилизации магнитной ловушки и создает условия для развития взрывной неустойчивости суббури. (см. например, [20]).

Основным параметром, определяющим структуру и динамику плазменной конфигурации, является плазменный параметр ,

$$\beta = 2\mu_0 p / B^2 ,$$

где  $p$  – давление плазмы,  $B$  – величина магнитного поля,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

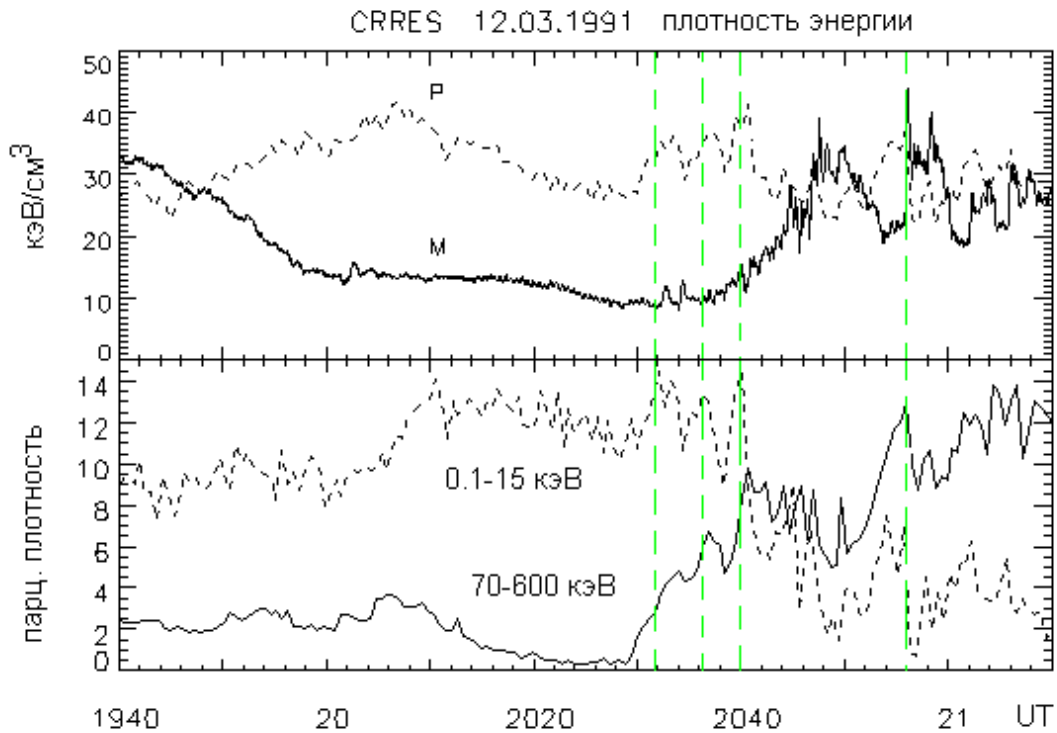


Рис 13. Верхний блок - плазменное давление и плотность энергии магнитного поля, нижний блок - парциальное давление для трех диапазонов энергетического спектра ионов

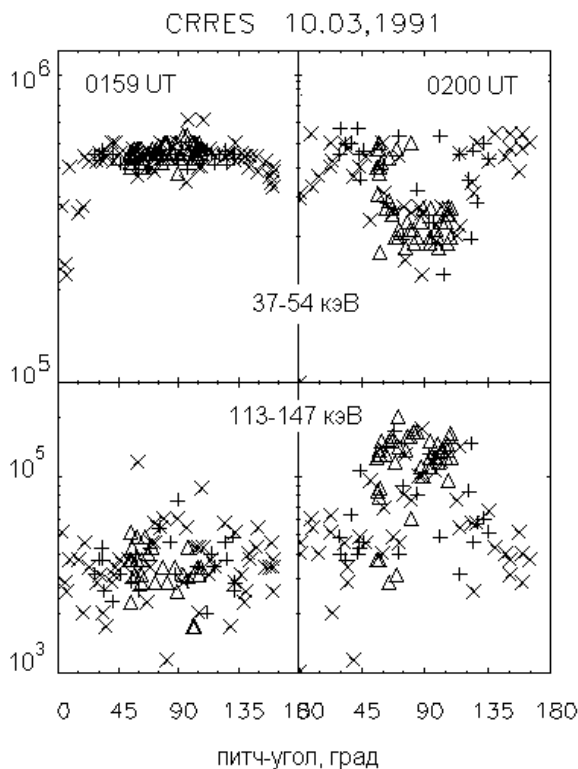


Рис 14 Питч-угловое распределение ионов.

энергетического спектра ионов. На рис 13 в верхней панели приведено сравнение плазменного давления с плотностью энергии магнитного поля, а в нижней панели – ход парциального давления ионов с энергией 0.1 – 15 кэВ, и 70 – 600 кэВ. До 1945 UT давление плазмы ниже давления магнитного поля и определяется в основном захваченными энергичными ионами. После этого спутник входит в плазменный слой, разогретый предшествующей активностью, и давление плазмы начинает расти за счет частиц с энергией ниже 30 кэВ и становится выше магнитного. Плазменный параметр на подготовительной фазе имеет значение 2 – 3 и это без учета

вклада продольных частиц. Максимальная величина  $\beta = 4$  наблюдается перед началом крупномасштабной диполизации, затем соотношение давлений падает и испытывает глубокие вариации в обе стороны от величины  $\beta = 1$ . Сравнение с наземными измерениями полярных сияний и магнитного поля показывает, что каждое возрастание давления плазмы предшествует началу суббулевой активизации (пунктирные линии), после чего давление падает. Можно предположить, что рост давления является важным фактором подготовки очередной неустойчивости.

Что касается механизма ускорения энергичных ионов, тут пока определенности нет. Существенным может быть отсутствие синхронности в динамике ионов разных энергий. На рис 14 приведен пример различного, противоположного изменения потоков захваченных ионов – менее чем за одну минуту поток энергичных частиц растет, тогда как в младшем канале спектрометра регистрируется падение потока захваченных ионов.

Таким образом, мы приходим к выводу в том, что инжекция энергичных ионов во время суббури не является следствием некоего одного процесса ускорения, а есть совокупность, последовательность актов ускорения на отдельных суббулевых активизациях. Авроральные электроны тоже ускоряются во время активизаций, однако со сдвигом во времени – ионы до взрывного начала неустойчивости, электроны – во время развития неустойчивости и локальной диполизации. Суммарный эффект десятка и более активизаций создает почти одновременную картину инжекции ионов и электронов. Расхождения во временной структуре инжекций и не всегда заметный начальный сдвиг рассматривались как несущественные детали и наличие некоего общего механизма инжекции электронов и ионов не вызывало сомнения.

### **6.3.1.5 Высыпание энергичных авроральных частиц в атмосферу.**

Общим источником ионосферных, магнитных возмущений и полярных сияний на активной фазе суббури является высыпание в атмосферу авроральных электронов, ускоренных в момент брейкапа и дрейфующих на утреннюю и дневную сторону.

Высыпания частиц создают специфические для брейкапа изменения состояния ионосферы. Ионосферные станции в эти моменты перестают принимать отраженный сигнал, наступает так называемый блокаут - полное экранирование на частотах в единицы мГц. Риометры, измеряющие поглощение космического радишума на частотах 25-50 мГц, регистрируют всплески поглощения, отражающие временную структуру всплесков высыпания энергичных электронов. Повышенная ионизация в D-области ионосферы, вызванная этими высыпаниями и является причиной поглощения.

Для исследования тонкой временной структуры и энергетического спектра высыпаний используются спектрометры тормозного рентгеновского излучения авроральных электронов с  $E > 20$  кэВ, поднимаемые на аэростатах. Прямые измерения проводятся с помощью низковысотных спутников и ракет.

Деление авроральных электронов на две энергетические группы отражается и в механизме и пространственно-временных характеристиках высыпаний. Низкоэнергичные электроны ускоряются продольными электрическими полями,

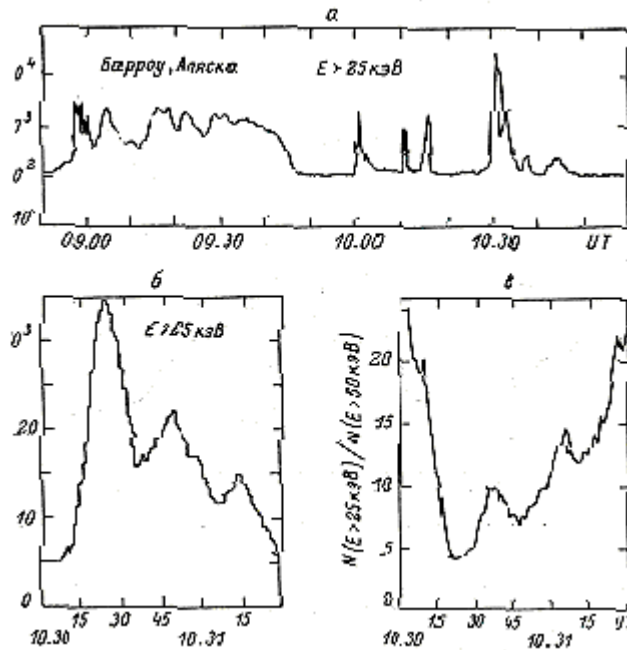


Рис 15. Всплески тормозного рентгеновского излучения в возмущенное время, измеренные на аэростате. Внизу – тонкая временная структура (три активизации) одного из всплесков и последовательное смягчение энергетического спектра фотонов.

что непосредственно приводит к сбросу частиц в ионосферу. Энергичные электроны ускоряются в экваториальной плоскости и преимущественно с питч-углами близкими к  $90^\circ$ . Сброс в атмосферу при этом обеспечивается за счет питч-угловой диффузии. В первом приближении высыпания энергичных электронов можно разделить на две группы - прямые высыпания из источника в процессе ускорения, в режиме быстрой диффузии и более медленный сброс частиц из дрейфующих облаков авроральных электронов.

На рис. 15 приведены результаты измерения тормозного рентгеновского излучения в момент брейкапа в аэростатном эксперименте Баркуса на Аляске. Справа внизу дается график отношения двух энергетических каналов детектора, из которого следует, что в максимуме каждого всплеска происходит ужесточение спектра.

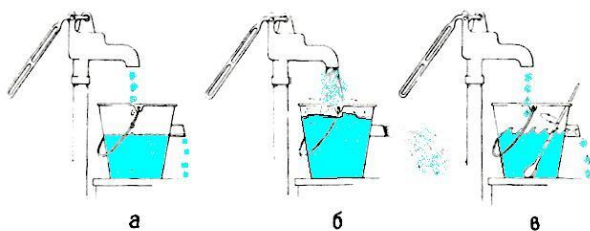


Рис 16. Водопроводные аналогии сброса частиц из магнитосферной ловушки используются для объяснения пульсаций частиц.

Значительную роль в динамике частиц в авроральной магнитосфере играет взаимодействие с волнами. Колебательный характер движения несет возможность возбуждения волн и резонансного взаимодействия. Результатом является питч-угловая диффузия, радиальная диффузия, нарушение равномерного

пространственного распределения частиц, группировка в дрейфовые пучки и бунчировка в сгустки при продольных колебаниях частиц. Эти процессы приводят к пульсациям и микровсплескам потока высыпающихся частиц, полярных сияний и геомагнитного поля, изучение которых составляет

обширный раздел физики магнитосферы и ионосферы. Пример пульсаций и микровсплесков приведен на рис 17

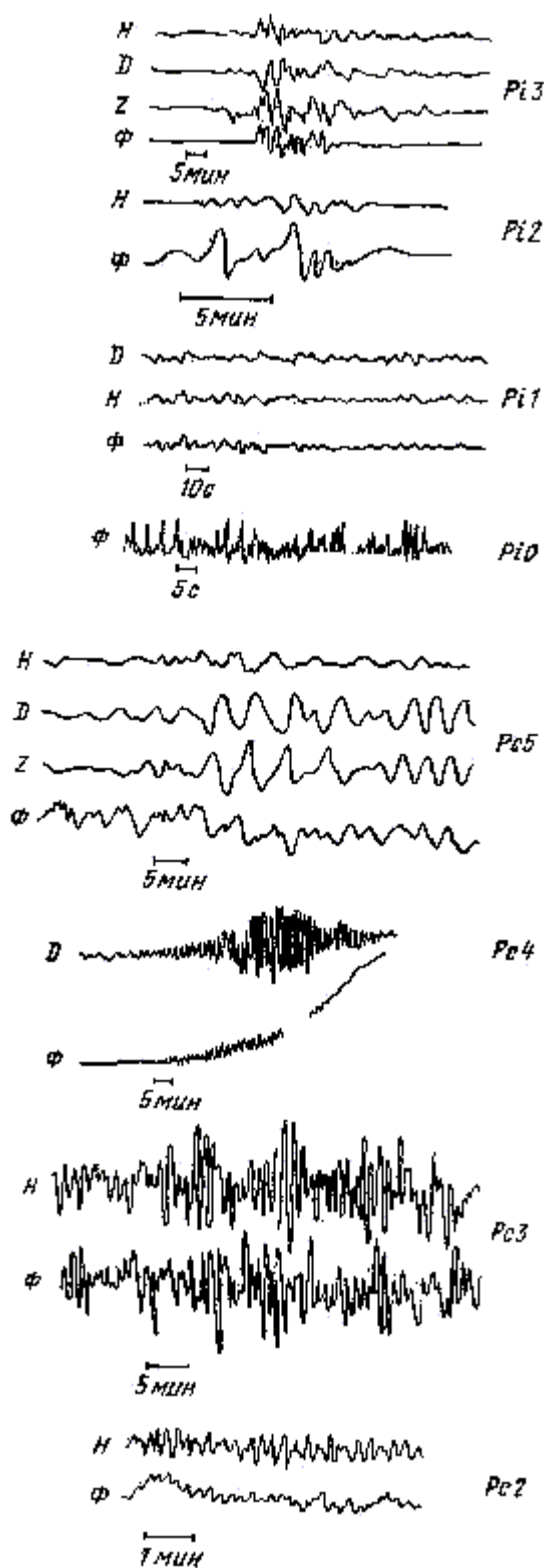


Рис 17 Типы пульсаций магнитного поля

**Низковысотные спутники** с полярной орбитой являются одним из основных, наиболее распространенных, источников информации о потоках энергичных частиц в магнитосфере. В отечественной науке значительную роль сыграли спутники серии "Космос", среди многочисленных зарубежных спутников выделим спутники DMSP, данные которых доступны для общего пользования и поэтому часто использовались для научного анализа.

По материалам измерений низкоэнергичных электронов и ионов на спутнике DMSP Ферфилд а за ним Гальперин и Фельдштейн и Ньюмен. выделили несколько областей обитания частиц и границ между ними и сделали ряд предположений о их соответствии зоне полярных сияний и границам в возмущенной магнитосфере. На рис. 18 приведена схема границ высыпаний электронов и полярных сияний для полуночного сектора магнитосферы в разгаре умеренного возмущения. Вертикальными стрелками показан диапазон возможного смещения границ.

Если сравнить приведенную схему с измерениями AP в магнитосфере, получится достаточно непротиворечивая картина. Экваториальная граница центрального плазменного слоя, граница аврорального овала соответствуют околосферной границе авроральной магнитосферы, которая может располагаться, на склоне или вблизи максимума внешнего радиационного пояса Земли в ОКЗ,

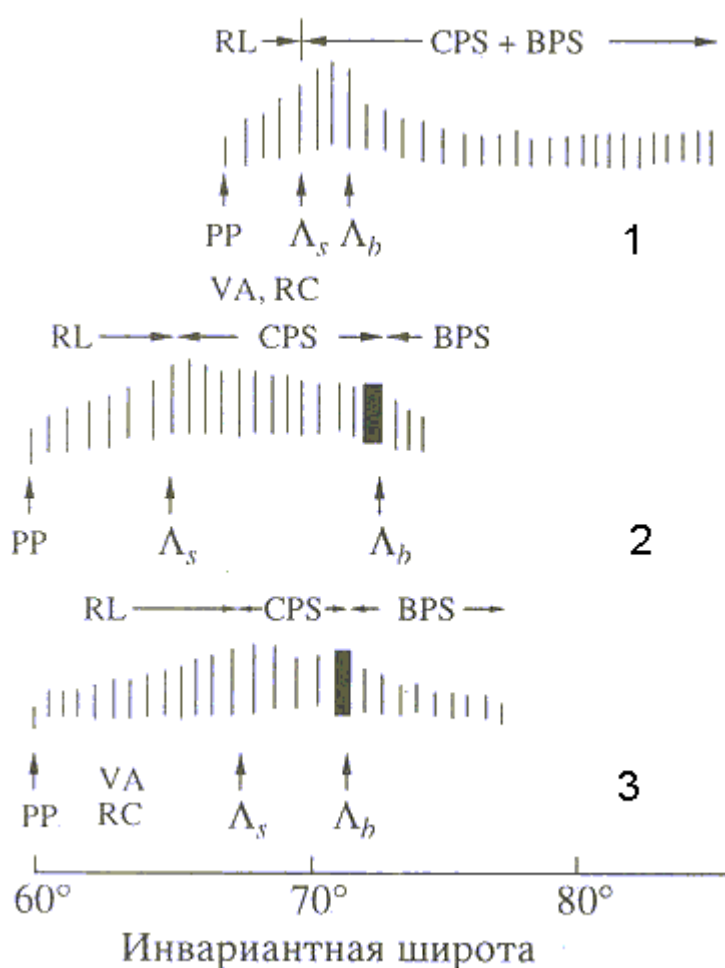


Рис 18. Зоны плазменных конфигураций по Гальперину и Фельдштейну.

совпадающего по определению с границей "устойчивого захвата". Пограничный плазменный слой совпадает с приполюсной частью двойного овала полярных сияний и проектируется на внешнюю границу авроральной магнитосферы с хвостом магнитосферы. Резкое различие энергетических спектров и других характеристик центрального и приграничного плазменного слоя свидетельствует о различии механизмов ускорения частиц и процессов суббури в целом в авроральной магнитосфере и в хвосте магнитосферы.

**Ионосферные эффекты высыпаний.** Высыпание частиц в атмосферу вызывает ионизацию и ионосферные токи, наиболее ярким проявлением которых на наземных магнитограммах являются бухтообразные возмущения во время суббурь. По магнитограммам высокоширотной сети станций можно построить эквивалентную картину токов, текущих в ионосфере, ответственных за то или иное возмущение магнитного поля. Такие токовые системы называют эквивалентными, потому что реальные токовые системы трехмерны. В спокойное время в высоких широтах существуют токовые системы в виде двух вихрей, выявленная по данным сети магнитометров и получившая название Dp11. (рис 19a), которая ассоциируется с электрическим полем конвекции. На вечерней стороне электроджет направлен на утро и вызывает положительное

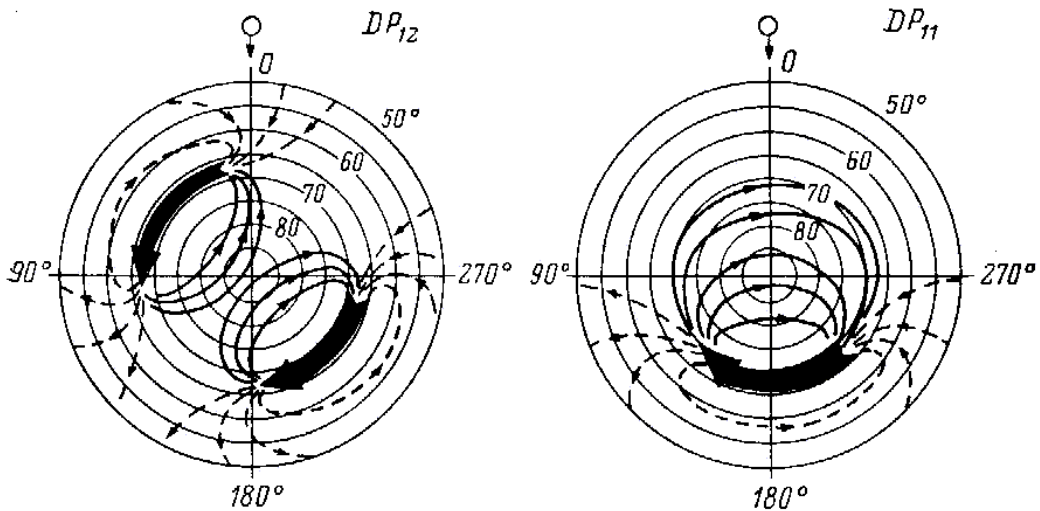


Рис 19 Ионосферные токовые системы Dp11 и Dp12

отклонение в Н-составляющей магнитного поля, тогда как противоположное направление тока на утренней стороне дает отрицательное отклонение. Переход от восточного к западному току, регистрируемый вблизи полуночи, носит название разрыв Харанга. (Harang discontinuity). На подготовительной фазе суббури система Dp11 усиливается и к ней на фазе экспансии суббури добавляется вихрь Dp12 (рис 19 справа) и резко усиливает западную электрострую. Это дополнительный короткоживущий ток связывают со сбросом в ионосферу авроральных электронов и индукционным электрическим полем суббуревых активизаций.

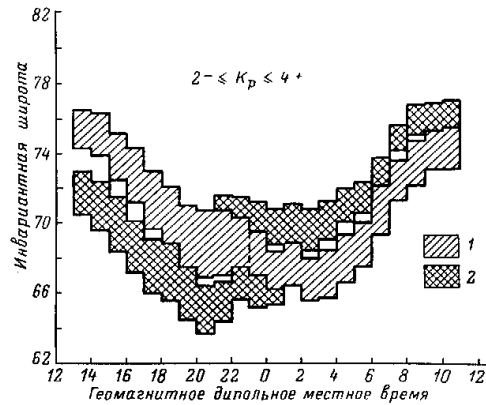
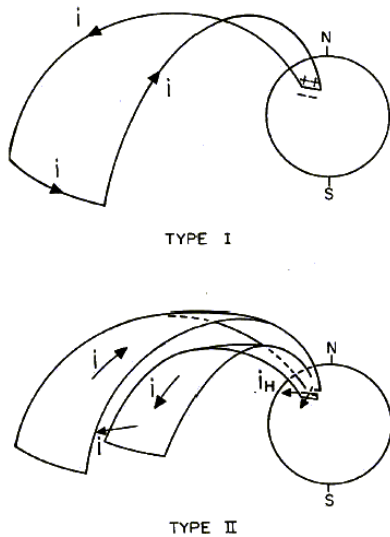


Рис 21. Два типа токовых систем (Ииджима и Потемра)

Рис 20. Конфигурации продольных токов по Бострему.

Существование трехмерных токовых систем в магнитосфере было предсказано норвежским ученым Биркеландом, наименование **токи Биркеланда (Birkeland currents)** часто встречается в литературе. Измерения на спутниках подтвердили догадку Биркеланда. Два возможных конфигурации продольных токов были рассмотрены Бостромом (Bostrom, 1964) (рис 20):



В системе типа 1 ток втекает на утренней стороне и вытекает на вечерней, в системе типа 2 ток втекает на северной (полюсной) полосе и вытекает на экваториальной. Оба типа токовых систем, предсказанные Бостремом, обнаруживаются при анализе измерений магнитного поля и/или фигурируют в моделях магнитосферных возмущений. Они могут иметь глобальный или локальный характер.

На рис 21 приведена схема продольных токов в проекции на ионосферу, построенная Ииджимой и Потемрой (1976) по данным спутника "Триад". Высокоширотная и низкоширотная токовые зоны совпадают с с границами овала полярных сияний.

### 6.3.2. ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

#### 6.3.2.1. Морфология и классификация полярных сияний (С.И. Исаев).

Согласно принятой классификации формы полярных сияний делятся на три группы: *лентообразные*, *диффузные* и *лучи*.

**К лентообразным** относятся *дуги (А)* и *полосы (В)*. Они характеризуются непрерывной *нижней* границей.

Дуги имеют вид арки, протянутой с запада на восток с правильным, обычно резко очерченным нижним краем. Часто встречаются мультиплетные дуги с интервалом 30-40 км. Если нижний край сияний неправильный и содержит изгиб или складку, форма сияния называется полосой. Полоса обычно более подвижна, чем дуга.

Лентообразные сияния простираются в направлении восток- запад на несколько тысяч километров, а по вертикали - на несколько сотен километров. Дуги, например, могут простираться на расстояние до 5-6 тыс. км и более, а поперечные размеры их - до 6°. В редких случаях ширина дуги вдоль меридиана достигает 13-14°. Сама лента имеет толщину всего несколько сотен метров, из чего можно сделать вывод, что сияния такого типа вызываются узким электронным пучком. Ленточные формы часто имеют вид многоярусных занавесей, висящих одна на другой и простирающихся через весь небосвод. Когда лента становится несколько более активной и подвижной, она образует тончайшие складки толщиной в несколько километров. Такая форма свечения кажется состоящей из отдельных вытянутых струй или лучей света; тогда она называется *"лучистой дугой"*. При повышении активности складки расширяются до нескольких десятков километров. Когда на большие складки налагается тонкая структура "лучей", то такую форму свечения называют *"лучистой полосой"*. Если активность продолжает возрастать, лучистая полоса образует красивую розовато-оранжевую кайму в нижней части складки (обычно эту форму называют *сиянием типа В*)...Наконец, если интенсивность возрастает еще больше, складки и петли расширяются до огромных размеров (сотни километров).

**Диффузные формы** сияния могут иметь вид *пятен (Р)* с нечеткими границами, напоминающих облака, освещенные луной, и вид *вуали (V)*. Вуаль представляет собой протяженное однородное свечение, которое часто покрывает большую часть неба. Пятна возникают обычно в зоне полярных сияний на последней стадии развития явления.

**Лучи (R)**, узкие пучки света, расположенные в пространстве вдоль силовых линий магнитного поля Земли, подразделяются на три группы (в зависимости от их длины): *короткие* (яркие у нижнего края и бледнеющие с высотой), *средние* (одинаковая яркость по всей высоте) и *длинные* (обычно однородные по яркости, но довольно слабые). Могут наблюдаться пучки лучей, расположенных тесно друг около друга либо разбросанных. Часто лучи наблюдаются одновременно с другими формами.

**Пламенное сияние** рассматривалось раньше как самостоятельная форма. Теперь признано, что эта форма является редким видом пульсации, одновременно происходящей на большой площади. Это явление, как известно, протекает в виде волн света, вздымающихся вверх одна за другой. Такое сияние возникает при определенных условиях синхронизации пульсации и движения.

Наиболее эффектная форма - "**корона**" также является несамостоятельной формой, так как она возникает лишь в случае появления лучей в магнитном зените. Однако для нее сохранен свой символ (**C**).

Дальнейшее описание сияний требует рассмотрения структурных элементов. По международной классификации существует *три типа структур: однородная (H), волокнистая (бороздчатая) (S) и лучистая (R)*. Однородным сияние считается в случае, когда в нем отсутствует внутренняя структура свечения, без видимых лучей. Волокнистая структура состоит из довольно беспорядочных полосок или волокон, расположенных приблизительно параллельно нижнему краю. Лучистая структура свечения как бы соткана из массы отдельных, часто мерцающих лучей.

Очень важным элементом новой классификации является описание *активности сияния (a)*. **Спокойные формы (q)** почти не меняются или меняются очень медленно.

**Активная форма** подвержена быстрым изменениям во времени и пространстве. Активные сияния обычно яркие. Введено четыре группы активности (**a1-a4**), учитывающие характер движения как внутри самой формы сияния (образование складок вдоль границы, движение лучей, появление новых форм), так и при ее движении в целом.

Активность полярных сияний развивается от спокойных форм, обычно с однородных дуг, затем спокойные формы образуют лучи, и завершается процесс развития облакообразными пятнами. Однако многие формы сияний исчезают, даже не успев разбиться на пятна. Когда активность сияний спадает, складки исчезают, лента возвращается к однородной форме. Это наводит на мысль, что однородная структура свечения представляет собой фундаментальное свойство полярных сияний, а складки и спирали связаны с процессом роста активности явления. Основной формой свечения на вечернем небе высоких широт считается однородная спокойная дуга со средней интенсивностью. Распределение интенсивности свечения в дуге наиболее равномерное: более яркое внизу и постепенно исчезающее кверху на фоне свечения неба.

Следующим параметром, характеризующим сияния, является **яркость**. Яркость визуальных наблюдаемых сияний оценивается международным коэффициентом яркости. При определении яркости учитывается максимальная интенсивность в данной форме. Для самой интенсивной линии полярного сияния (5577 А), принадлежащей атомному кислороду, индекс яркости определяется по международной шкале (табл. 1); за единицу измерения принят релей (R). Новая

световая единица введена специально для измерения спектральной интенсивности свечения ночного неба и полярных сияний.

**Таблица 1 Международная шкала яркости полярных сияний**

| Интенсивность эмиссии 5577 А, kR | Индекс интенсивности | Примечание                                                             |
|----------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 0.1                              | 0                    | Сияние визуально не фиксируется, может быть обнаружено инструментально |
| 1                                | I                    | Яркость сравнима с яркостью Млечного пути.                             |
| 10                               | II                   | Яркость сравнима с яркостью перистых облаков, освещенных Луной.        |
| 100                              | III                  | Яркость сравнима с яркостью кучевых облаков, освещенных Луной.         |
| 1000                             | IV                   | Яркость много больше III.                                              |

Интенсивность свечения в один релей соответствует эмиссии  $10^6$  квантов, испускаемых в одну секунду в столбе атмосферы сечением 1 см<sup>2</sup>:  
 $1R=10^6$  фотонов/ (колонна) см<sup>2</sup> сек.

Слово "колонна" означает, что речь идет о суммировании по всему вертикальному столбу атмосферы данного сечения. Килорелей (кR) соответствует излучению  $10^9$  фотон/см<sup>2</sup> в сек. Интенсивность в реляях соответствует увеличенной в  $4\pi$  раз поверхностной яркости однородно светящейся атмосферы.

Как можно видеть из табл. 1, интенсивность эмиссии полярных сияний (вместе с тем и интегральная их яркость) может изменяться примерно в 10 000 раз. Соотношение интенсивности отдельных эмиссий в каждом сиянии также непостоянно.

### 6.3.2.2. Пульсации полярных сияний

Другой важной характеристикой активности сияний служит **пульсация (P)**, которая подразделяется на четыре группы **(P1,2,3,4)**. Пульсация описывает быстрые ритмические флуктуации яркости с периодом обычно от долей секунды до минуты. К определенному типу пульсирующих принадлежит, как уже указывалось, пламенное сияние. Быстрое нерегулярное изменение яркости называется "*мерцанием*".

Пульсации сияний преимущественно с периодом 3-25 сек., сопровождающиеся аналогичными пульсациями геомагнитного поля (типа Pi1).

Быстрые пульсации интенсивности отдельных эмиссий в полярных сияниях в диапазоне 1-20 гц в интегральном свете и в линии 4278 А N<sub>2</sub><sup>+</sup> схожи между собой; в линии 5577 А быстрые вариации отсутствуют, что, повидимому, связано с большим временем жизни возбужденного атома в состоянии 'S.

Пульсации большей частью сопровождают медленные вариации интенсивности свечения, но иногда появляются независимо.

Спектры мощности пульсации характеризуются быстрым уменьшением мощности на 1 гц с увеличением частоты. По-видимому, существует большое различие между пульсациями с низкими частотами и частотами более 1 гц. Высокочастотные пульсации довольно иррегулярны и появляются только при сияниях в виде слабых диффузных пятен исключительно после магнитной полуночи.

### 6.3.3. МАГНИТОСФЕРНЫЕ СУББУРИ

#### 6.3.3.1. Определения

Термин **суббурия (substorm)** был введен в 1961г. С-И. Акасофу для обозначения авроральных возмущений в зоне сияний длительностью порядка часа. В магнитных данных еще раньше были выделены **бухтообразные возмущения**, совпадающие по времени с суббурей в полярных сияниях. Со временем термин "**магнитосферная суббурия**" объединил большую совокупность процессов в магнитосфере и ионосфере.

**Элементарная изолированная суббурия** представляется последовательностью Трех фаз – **подготовительной (growth phase)**, **активной (active)** и **фазой восстановления (recovery)**. В активной фазе выделяют момент **начала (onset)** и фазу **расширения или экспансии (expansion)** длительностью в 5-15 минут, заканчивающуюся когда в процессе расширения активности к полюсу достигается максимальная широта.

Реальная суббуревая активность сложнее и если удастся выделить несколько интервалов с элементами суббури, тогда говорят о очередной **интенсификации** суббуревой активности. В свою очередь в каждой суббуре и интенсификации можно выделить несколько пространственно локализованных **активизаций** длительностью в несколько минут, отражающих взрывной неустойчивости.

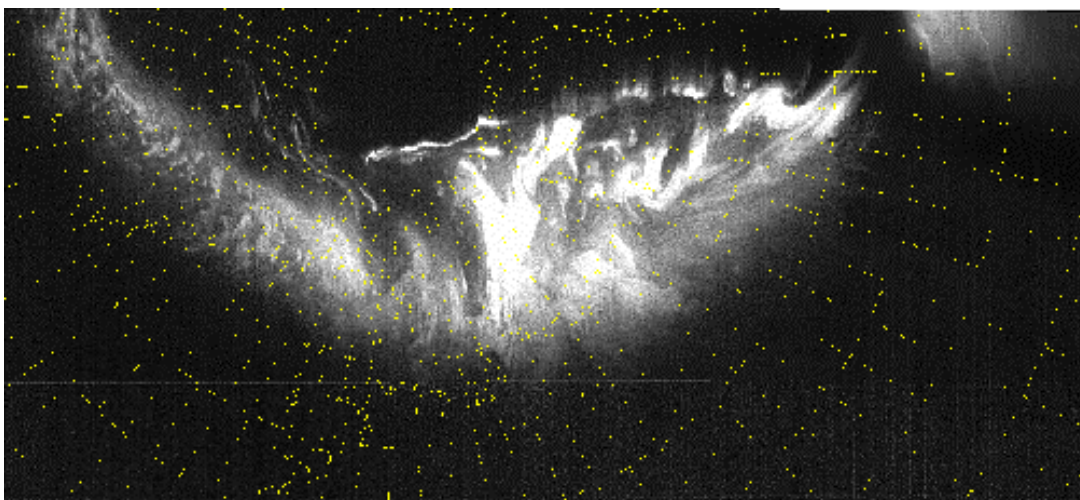


Рис 22. Картина полярных сияний, полученная на спутнике DMSP.

Несколько структурных элементов суббури выделены по полярным сияниям. На рис 22 приведена картина сияния в полуночном секторе, полученная на спутнике DMSP. Здесь на фазе экспансии сияние образует **авроральную выпуклость (bulge)**, расширяющуюся к полюсу. Кроме того, на западном фланге выпуклости активные сияния образуют резкую границу, ориентированную по меридиану, т.н. **WTS (westward travelling surge)**. Западнее выступа продолжаются процессы, характерные для подготовительной фазы. Скачек такого выступа на запад означает новую суббуревую активизацию. Видна также на снимке пограничная **приполюсная дуга** сияния, которая расположена на границе ОКЗ и хвоста магнитосферы.

Мощность суббури можно оценить по максимальной величине бухты в Н-составляющей магнитного поля (от ~100 до 1000нТ) и по площади охваченного возмущением пространства, по протяженности экспансии суббури к полюсу. У слабых, недоразвитых суббурь экспансия практически отсутствует; их называют **псевдобрейкапами (pseudobreakup)**.

### 6.3.3.2. Структура изолированной суббури.

На Рис 23 приведена кеограмма сияний – развертка во времени меридионального профиля светимости, полученная обработкой телевизионной съемки сияний в обсерватории Ловозеро.

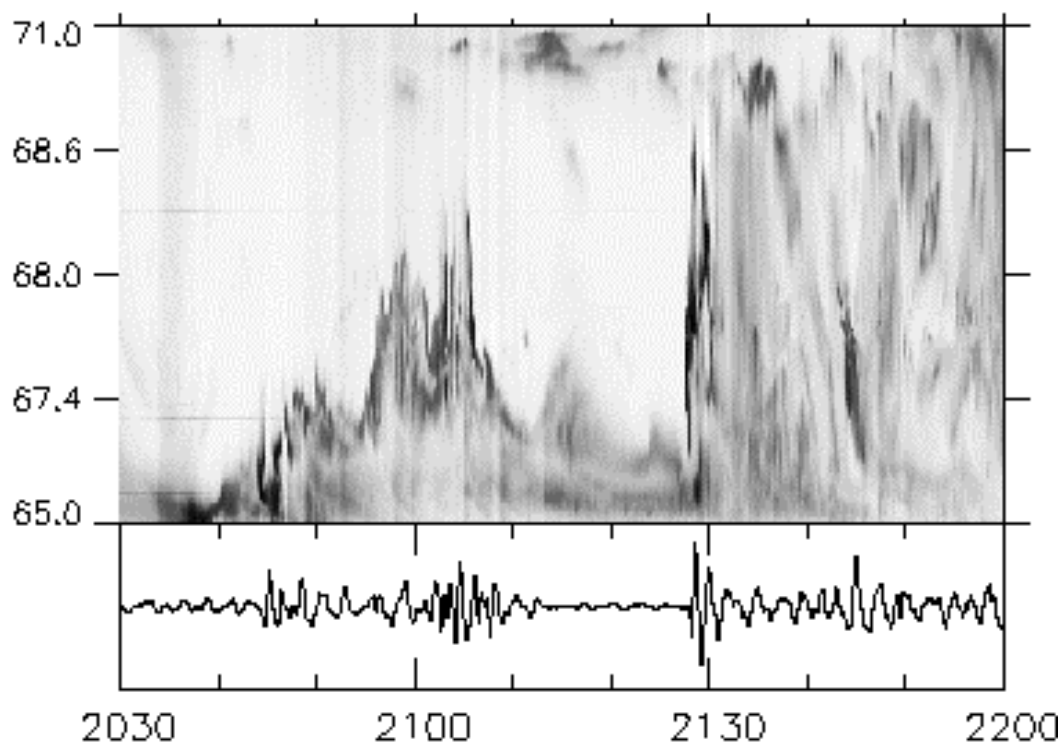


Рис 23. Кеограмма полярных сияний

Период времени до 2128 UT относится к подготовительной фазе, далее следует короткий интервал экспансии и постепенное успокоение до новой вспышки

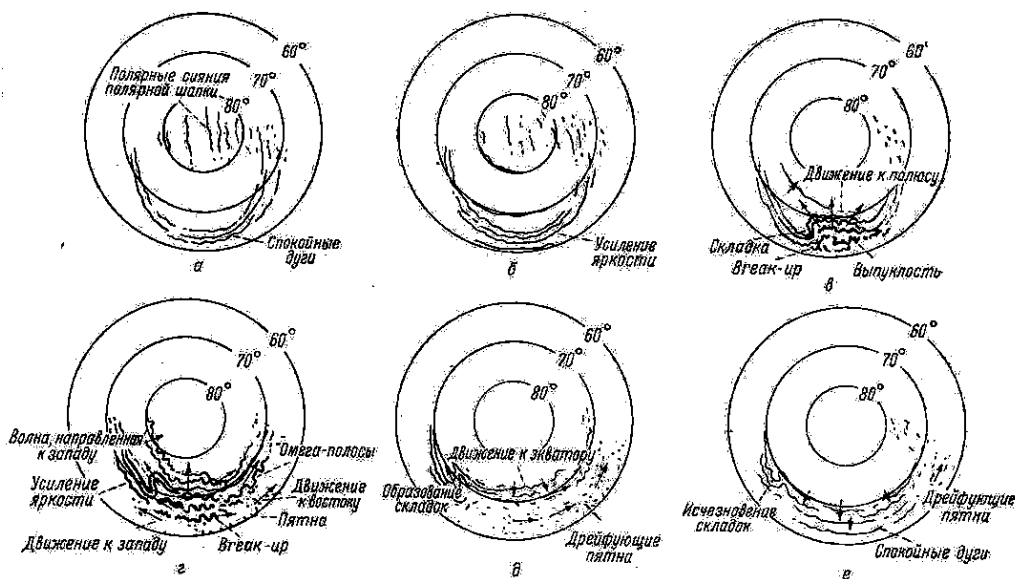


Рис. 24 Схема суббури в полярных сияниях (Акасофу).

активности. В нижней части приведены графики пульсаций  $Pi2$ , цуг всплесков максимальной амплитуды наблюдается в начале экспансии, хотя пульсации видны и раньше, во время активизаций подготовительной фазы.

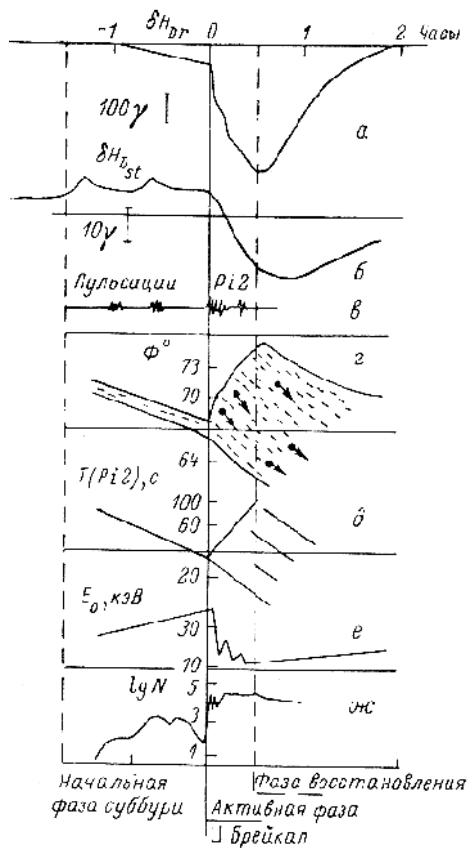


Рис 25. Схема суббури, Пудовкин,Исаев

Приведем две схемы развития субури, предложенные на ранней стадии исследований и ставшие классическими: схему Акасофу суббури в полярных сияниях (рис 24) и комплексную схему субури Пудовкина-Исаева (рис 25). На последней сверху вниз приведено: а) Вариация Н-составляющей магнитного поля в зоне полярных сияний, б) то же на среднештотной станции, в) пульсации  $Pi2$ , г) Движение дуг сияний, д) Изменения периода пульсаций  $Pi2$ , е) изменение жесткости спектра и ж) потока высыпающихся энергичных электронов.

**Подготовительная фаза** начинается с поворота вектора межпланетного магнитного поля к югу (составляющая ММП  $B_z < 0$ ), что усиливает поступление энергии в магнитосферу. Определяющая роль в этом отводится крупномасштабному электрическому полю, направленному с утра на вечер поперек хвоста и авральной магнитосферы. Суммарная разность потенциалов оценивается в 40-100 кВ. По поводу физического механизма возникновения электрического поля не существует единого общепринятого мнения. Наибольшее распространение получила идея связи электрического поля с вихревой крупномасштабной конвекцией плазмы в хвосте магнитосферы, поэтому его часто называют

полем конвекции. Конвективное поле усиливает и сдвигает к Земле дрейфовый ток в зоне квазизахвата, что меняет конфигурацию магнитосферы, вытягивая силовые линии в хвост. Магнитное поле в долях хвоста растет за счет переноса магнитного потока с дневной стороны и толщина плазменного слоя в хвосте уменьшается. Вместе с тем, конвективная гипотеза сталкивается с рядом трудностей, во первых, идея ламинарных течений плазмы в хвосте не подтверждается экспериментом, скорости хаотического движения на порядок превышают направленную компоненту, во вторых, регистрируемые быстрые изменения электрического поля не обеспечиваются медленным процессом раскручивания конвективного вихря.

Подготовительная фаза хорошо прослеживается по наблюдениям полярных сияний - время от времени возникают на севере и движутся к югу диффузные дуги. Предполагается, что скорость движения дуг определяется как радиальный  $E \times B$  дрейф авроральных частиц.

**Фаза экспансии** является наиболее ярко выраженным процессом активной фазы – это преимущественное движение активных сияний к полюсу (poleward expansion). Оно может быть плавным, движение дуги или ее сегментов или скачкообразным, с образованием новых активных форм полюснее предыдущих. Внутри расширяющейся к полюсу *выпуклости (auroral bulge)* отдельные дуги могут двигаться и к экватору.

Развитие экспансии в виде отдельных активизаций отражается и в структуре, временной и пространственной, ускорения и сброса частиц, и в пульсациях P12, повторяющих временной ход цепочки активизаций.

До сих пор остается неясным, почему некоторые возмущения приводят к экспансии, а другие - нет. Возможно существенное подавление экспансии может вызывать электрическое поле солнечного ветра. Если начало суббури было спонтанным и межпланетное магнитное поле остается отрицательным, возможно тогда экспансия подавляется и ее пространственный пробег ограничивается несколькими градусами. С другой стороны, часто суббури начинаются тогда, когда  $B_z$  ММП меняет знак, электрическое поле уменьшается и не препятствует экспансии.

Расширение активной области на запад и на восток происходит по-разному: на западном направлении формируется в активной зоне выступ с северо-южным изгибом направления фронта сияний, так называемый WTS (Westward travelling surge), которые скачкообразно, серией последовательных интенсификаций, перемещается на Запад. Расширение на восток чаще наблюдается в виде новых суббурь, без видимой зависимости от активности в начальном секторе.

**Активная фаза** не заканчивается, когда экспансия прекращается. Активные формы сияний, может быть не такие яркие как в начале, продолжают возникать и двигаться по небу. Экваториальнее аврорального выступа развиваются пульсирующие сияния, в основном в виде пятен, таким способом магнитная ловушка освобождается от избытка авроральных частиц. На западе на границе WTS, еще недостаточно изученной, течет мощная струя продольного тока, разделяются популяции частиц и готовится новая интенсификация суббури с расширением скачком к Западу.

В ионосфере на активной фазе происходит смена токовых систем. На подготовительной фазе реконструкция токов по сети магнитометров дает систему DP12 (рис 19) двухвихревой структуры с границей между восточной и

западной электроструей вблизи полуночи (так называемый разрыв Харанга). Активная фаза добавляет вихрь ДР11, который частично подавляет двухвихревую систему. Плоская в проекции на ионосферу система токов должна быть дополнена до трехмерной продольными токами вдоль магнитных силовых линий. Предлагается глобальная крупномасштабная система продольных токов (рис 20), которую во время активизаций суббури дополняют возникающим вследствие разрыва экваториального тока локальным токовым клином суббури (рис 26).

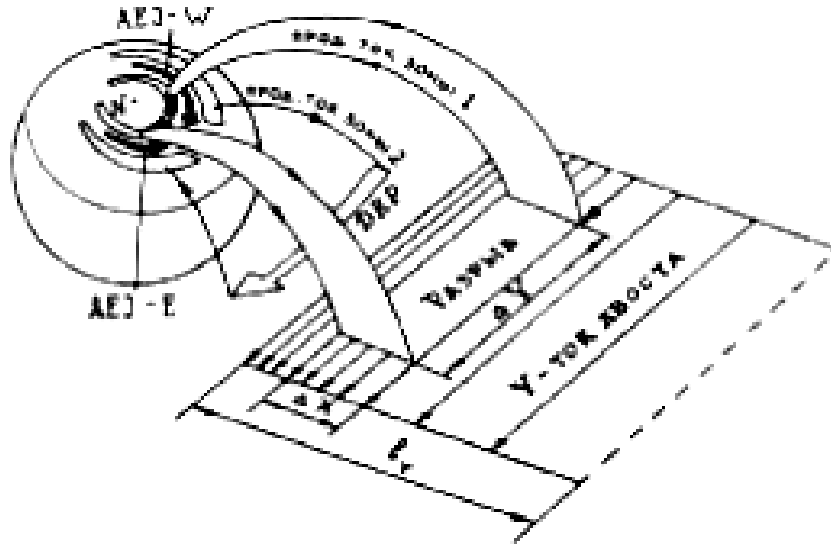


Рис 26 Схема токового клина суббури (Мишин)

**Фаза затухания** Довольно условна граница между активной фазой и фазой затухания. Так же условно и время окончания фазы затухания. Магнитосфера возвращается к спокойной структуре границ за 1-2 часа, если не происходит нового возмущения. Внешний радиационный пояс освобождается от избытка частиц, ускоренных во время суббури, довольно долго, отдельные типы микровсплесков рентгеновского излучения, свидетельствующие о сбросе частиц, наблюдаются и через сутки после сильной суббури.

### 6.3.3.3. Взрывная неустойчивость суббури

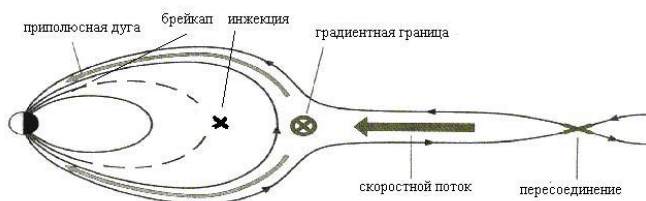


Рис 27 Две области возможного развития неустойчивости

расположение силовых линий магнитного поля противоположного направления может приводить к развитию пересоединения. (NENL - модель суббури).

#### **Начало активной фазы**

В конце подготовительной фазы в двух частях магнитосферы возникает напряженная, критическая ситуация, способная породить неустойчивость.

В хвосте, на расстоянии 25-50  $R_e$ , близкое



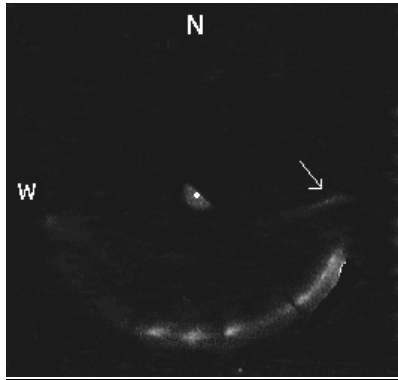


Рис 28 Фрагментация дуги, первая ступень брейкэпа

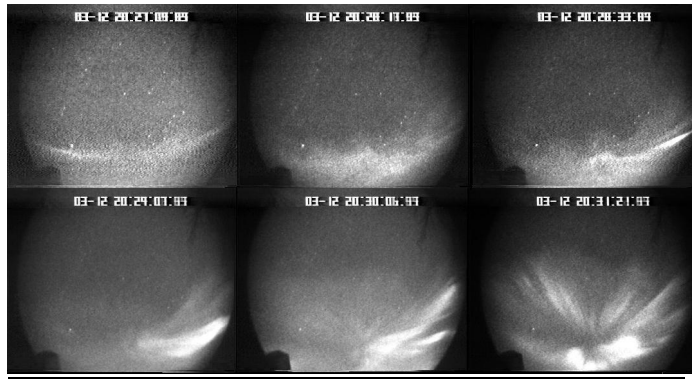


Рис 29 Вторая ступень - уярчение дуги и начало экспансии к полюсу.

В области квазизахвата, на 7-10 Re рост тока и градиента давления на границе плазменного слоя вызывает взрывное начало типа *баллонной неустойчивости (ballooning)* и/или токового разрыва (**current disruption instability**).

Взрывная неустойчивость, знаменующая начало активной фазы, вызывает целый ряд быстрых процессов, проявляющихся в наблюдениях в космосе и на Земле. В магнитосфере наблюдаются следующие три основных процесса:

- 1 - ускорение вдоль силовых линий и сброс в атмосферу кэВных электронов. Формирование локализованного токового клина.
- 2 - быстрая перестройка магнитного поля ближе к дипольному. Движение внешней границы зоны квазизахвата от Земли в хвост.
- 3 - ускорение ("инжекция") энергичных электронов и ионов и высыпание в атмосферу.

Следствием первого процесса является вспышка полярного сияния, вызываемая высыпанием авроральных электронов. На рис 27 приведены снимки сияния на переходе к активной фазе, дающие представление о пространственно-временных характеристиках начала уярчения сияний и начала активной фазы.

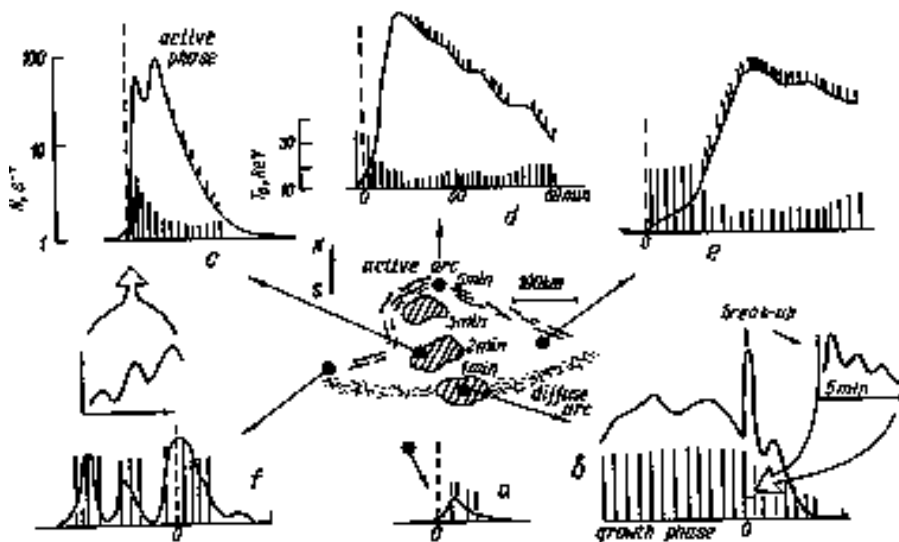


Рис 30. Типичные профили высыпания энергичных электронов.

Одновременно растет проводимость в ионосфере и начинается отрицательная бухта в Н-составляющей магнитного поля, наиболее крутая на ближайшей к эпицентру магнитной станции. Начинаются магнитные пульсации Pi2 и Pi1B.

В стратосфере на аэростатах регистрируется всплеск рентгеновского излучения, порождаемый высыпанием в атмосферу энергичных электронов. Структура высыпания существенно зависит от положения аэростата по отношению к центру развития неустойчивости, как показано на рис 30.

Как отмечалось в выше, во время экспансии суббури действует несколько механизмов ускорения частиц, крупномасштабных и локализованных. Для последних в качестве механизма предполагается ускорение в индукционных электрических полях. Одна из схем возникновения и развития индукционного поля в виде токового меандра, была предложена Хейкилкой и Пеллинеом. На рис 32 показана модификация меандра, возникающая при локальном понижении плотности дрейфового тока ( $J_y$ ). Индукционное электрическое поле способно ускорять энергичные электроны, и кроме того, благодаря наличию продольной компоненты – высыпающиеся авроральные электроны.

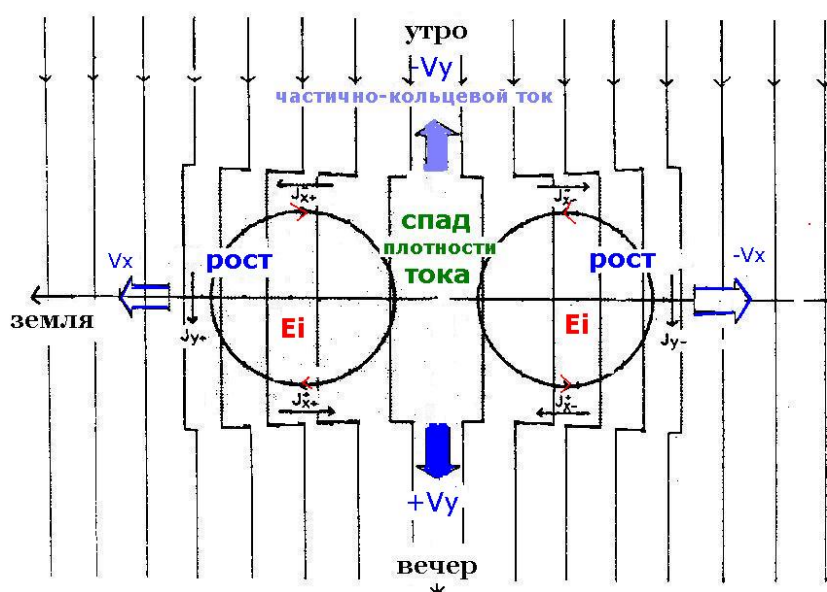


Рис. 31. Схема меандра Хейкиллы-Пеллинеа генерации электрического поля в начале или активизации суббури.

Вызванная высыпанием ионизация D-слоя ионосферы приводит к поглощению космического радишума, основным инструментом мониторинга поглощения служит сеть риометров. В магнитосфере и на Земле регистрируется всплески ОНЧ излучения.

Измерения электрического поля в магнитосфере показывает резкий рост переменной составляющей. В стратосфере немногочисленные измерения указывают на уменьшения поля, возможно связанное с тем, что силовые линии из магнитосферы в ионосферу перестают быть эквипотенциальными, вдоль силовых линий появляется аномальное сопротивление.

Все перечисленные события происходят одновременно с разбросом в 1-2 минуты, повторяясь со сдвигами в пространстве в серии локализованных активизаций. По мере роста чувствительности и временного разрешения аппаратуры выявляются все новые закономерности, иногда значительно меняющие сложившиеся представления.

Область квазизахвата вблизи полуночного меридиана полагается благоприятной для развития взрывной неустойчивости. Здесь магнитное поле имеет квазидипольную конфигурацию, силовые линии вытянуты в хвост, но способны удерживать и накапливать заряженные частицы в магнитной ловушке. При этом напряженность поля достаточно мала, чтобы плотность энергии частиц могла приближаться или превышать плотность энергии магнитного поля, создавая благоприятные условия для развития неустойчивости.

Значительная роль отводится при этом продольным и азимутальным токам, рост которых может также приводить к неустойчивости.

Долгое время область хвоста и механизм пересоединения считались непосредственно связанными с суббуревой активностью в авроральной зоне, а процессы в зоне квазизахвата - вторичными. В настоящее время наиболее адекватна экспериментальным данным **схема независимого развития** суббуревой активности в этих двух областях, с возможным их воздействием друг на друга. Имеется также позиция, отрицающая возможность или значимость процесса пересоединения, исходя из свидетельств существенной турбулизации структуры хвоста магнитосферы.

#### 6.3.3.4. Суббура во внешней магнитосфере.

Хвост магнитосферы включает следующие структуры. В центре находится тонкий **нейтральный слой (neutral sheet)**, по обе стороны от которого магнитное поле меняет направление. Нейтральный слой магнитного поля находится в центре **плазменного слоя (plasma sheet)** - области горячей плазмы, играющей важную роль в динамике возмущенной магнитосферы. Плазменный слой делится на две части - центральный плазменный слой (**CPS**), расположенный в зоне квазизахвата и внешний плазменный слой (boundary plasmasheet, **BPS**), расположенный собственно в хвосте магнитосферы.

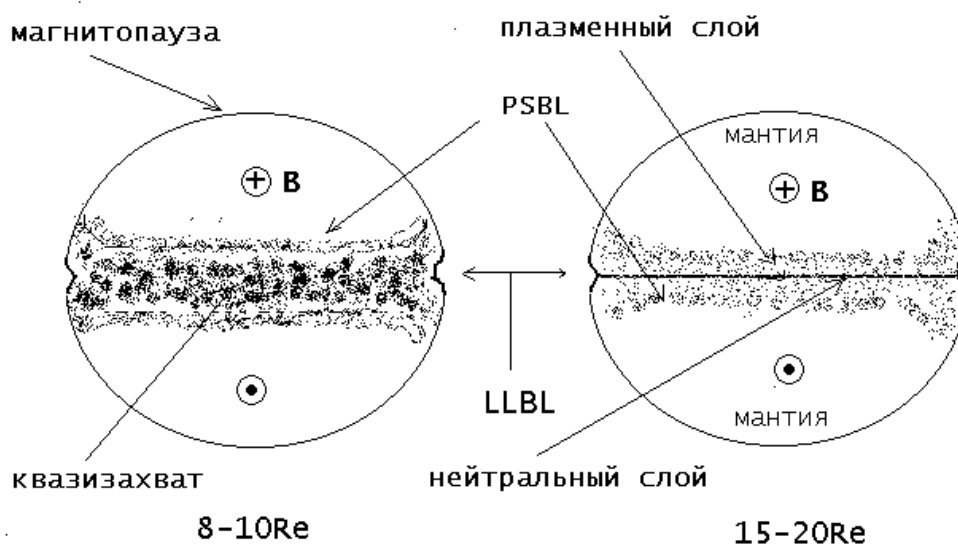


Рис 32. Сечение магнитосферы на ночной стороне на двух расстояниях от центра Земли.

Благодаря действию **электрического поля конвекции (convective E-field)**, частицы внешнего плазменного слоя проникают из хвоста ближе к Земле, в область квазизахвата. Вместе с тем этот резервуар частиц, дальнейшее ускорение которых обеспечивает заполнение радиационных поясов, вызывает полярные сияния и магнитные возмущения попополняется и за счет ускорения частиц из ионосферы. Внешние части плазменного слоя с юга и с севера от нейтральной плоскости имеют название **границный плазменный слой (plasmashet boundary layer, PSBL)**. Здесь плазма имеет более высокую плотность и температуру и здесь регистрируются узкие пучки направленных к Земле и от Земли энергичных электронов и ионов (**fast flux events FFE**), которые повидимому ответственны за активность сияний на приполюсной границе авроральной зоны. Дальний конец хвоста и признаки плазменного слоя наблюдаются вплоть до орбиты Луны ( $> 100 R_e$ ). Часть плазменного слоя на флангах, западном и восточном, носит название **низкоширотного плазменного слоя (Low Latitude Boundary Layer, LLBL)**. Эта часть плазменного слоя граничит с переходным слоем и солнечным ветром и поэтому интересна как для выхода частиц из магнитосферы (например, в области квазизахвата, так и для входа частиц из солнечного ветра, в частности, солнечных космических лучей.

На рисунке 32 приведены два поперечных разреза хвоста магнитосферы на расстояниях примерно 8-10  $R_e$  и 15-20  $R_e$ . Здесь хорошо видны уже упомянутые образования, к которым следует еще добавить так называемые **доли хвоста (lobes)** в которых малая плотность плазмы компенсируется повышенной величиной магнитного поля. Внешний, примыкающий изнутри к магнитопаузе слой долей хвоста именуется **мантлей (mantle)**.

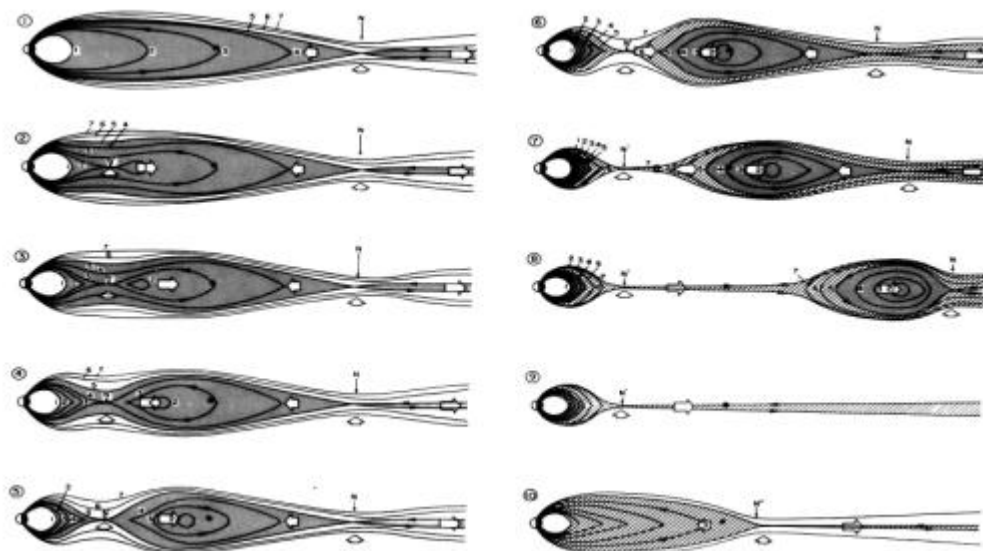


Рис 33. Модель суббури по Хоунсу.

Развитие суббури в хвосте магнитосферы связывается с процессом **пересоединения силовых линий (reconnection)**. (рис 33). Дело в том, что геометрия магнитного поля с параллельными противоположно направленными силовыми линиями неустойчива и возможно быстрое пересоединение силовых линий, "аннигиляция" магнитного поля с выделением большой энергии на

ускорение заряженных частиц. Впервые процессы пересоединения в приложении к вспышечным областям на Солнце были рассмотрены выдающимся советским физиком С.И.Сыроватским. Существуют теории, предполагающие образование в хвосте магнитосферы одной или двух (ближней и дальней) точек пересоединения. Длительное время модель пересоединения доминировала в исследованиях возмущенной магнитосферы, однако в последнее время модели суббури, основанные на представлениях о процессах в области квазизахвата, привлекают все большее внимание.

### 6. 3.3.5 Связь с солнечным ветром. Энергетическая схема суббури.

Суббуревая активность обеспечивается энергией солнечного ветра. Мощность источника регулируется направлением вертикальной компоненты межпланетного магнитного поля, она резко возрастает при южном (отрицательном) направлении  $V_z$ . Предполагается, что передача энергии происходит через электрическое поле солнечного ветра, величина которого пропорциональна скорости солнечного ветра и  $V_z$ . Следующим ключевым процессом в энергетической загрузочной цепочке является трансформация структуры магнитного поля магнитосферы - вытягивание силовых линий на ночной стороне Земли, усиление напряженности поля в долях хвоста, приближение внешней границы квазизахвата к Земле и рост кинетической энергии частиц в области квазизахвата..

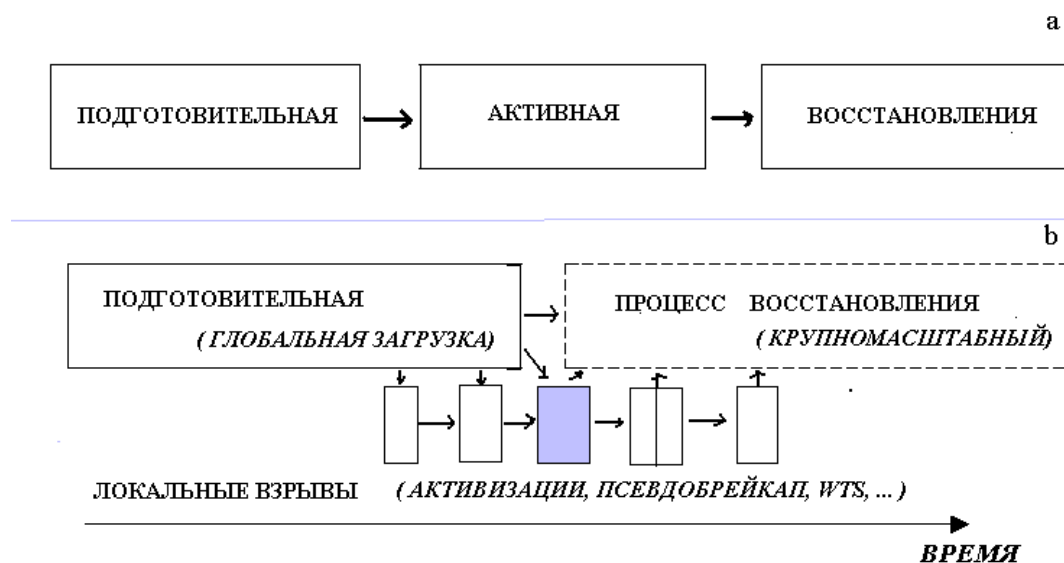


Рис 34. Обобщенная схема суббуревой активности.

Плазменное давление, его пространственное распределение, градиенты, динамика – являются одним из главных факторов, контролирующих структуру и динамику магнитосферы [28]. В этой связи быстрые изменения давления, рост и падение до и после активизаций следует отнести к определяющим процессам магнитосферной суббури. Плотность энергии энергичных ионов перед активизацией превышая плотность энергии магнитного поля, что может триггировать развития неустойчивости. Быстрый рост и падение плазменной плотности нарушают монотонный характер направленного к Земле градиента плазменного давления, и на участках обращения градиента возникает ток

направленный на восток, существование которого постулируется в некоторых моделях суббури ( ).

Показателем мощности элементов локальной активности является степень диполизации, возвращения структуры магнитного поля в нормальное состояние, которую можно также связать с размером экспансии активности к полюсу. Слабые активизации, псевдобрейкапы, имеют многие черты полноценной активной фазы элементарной суббури, за исключением экспансии.

Разрядка, высвобождение накопленной энергии начинается на поздней стадии подготовительной фазы в виде отдельных локальных активизаций и продолжается после окончания процесса загрузки, когда  $V_z$  меняет направление на северное. Таким образом, обобщенная схема суббуревой активности может быть представлена схемой на рис 34: глобальный процесс загрузки энергии, локализованные всплески активности и глобальная фаза затухания, когда магнитосфера освобождается от избытка частиц и возвращается в спокойное состояние.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ

- Антонова Е.Е., О продольных токах в полярной магнитосфере и ионосфере, *Геомаг. Аэрномия*, **19**(4), 676-679, 1979.
- Корнилова Т.А., Корнилов И.А., Пудовкин М.И. и др., Распространение сияний к полюсу во время фазы развития, *Геом. и аэрномия*, **38**, №1, 51-90, 1998
- Isaev, S.I. Polar aurora morphology (in Russian), Leningrad:Nauka, 1968.
- Лазутин Л.Л., Структура авроральной магнитосферы и взрывные процессы магнитосферной суббури, в кн: *Физика околоземного космического пространства*, Апатиты, Изд. Кольского научного центра РАН, 2000г. в 3х томах, т.2, стр. 145-192
- Лазутин Л.Л., Козелова Т.В., Мередит Н., Даниелидис М., Козелов Б.В., Юссилла Дж., Корт А., Суббурия 12.03.1991. Часть 1. Структура суббуревой активности и авроральные ионы. Часть 2. Ускорение и динамика авроральных электронов, *Косм. Иссл.*, в печати
- Пудовкин М.И., Зайцева С.А., Корнилова Т.А., Пелленен Р.И. Динамика сияний на экваториальной границе авроральной зоны, *Геом. и аэрномия*, **35**, 47-54, 1995
- Тверской Б.А., О продольных токах в магнитосфере, *Геомаг. Аэрномия*, **22**(6), 991-995, 1982а.
- Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М. Наука, 1968, 223 с.
- Akasofu, S.-I., Polar and Magnetospheric Substorms, Dordrecht: D. Reidel, 1968.
- Antonova, E.E., Magnetostatic equilibrium and current systems in the Earth's magnetosphere. *Adv.Space Res.*, **33**, 752-760, 2004.
- Antonova E.E., Investigation of the hot plasma pressure gradients and the configuration of magnetospheric currents from INTERBALL, *Adv. Space Res.*, **31**(5), 1157-1166, 2003.
- Barcus, J.R., Balloon Observations on the Relationship of Energetic Electrons to Visual Aurora and Auroral Absorption, *J. Geophys. Res.*, 1965, vol. 70, p. 2135.
- Baker, D.N., Hones, E.W., Higbie, P.R., Belian, R.D. and Stauning, P. Global properties of the magnetosphere during a substorm growth phase: A case study. *J.Geophys.Res.* 86:8941-8956, 1981.
- Baker, D.N., Pulkkinen, T.J., Angelopoulos, V., et al., Neutral Line Model of Substorms: Past Results and Present View, *J. Geophys. Res.*, 1996, vol. 101, p. 12975.
- Baumjohann W., Fast flows, braking, and dipolarization. Proc. 5th International Conference on Substorms, St.Petersburg, Russia, 16-20 May 2000 ,363-367, ESA SP-443, July 2000
- Birn, J.M., M.F. Thomsen, J.E. Borovsky, G.D. Reeves, D.J. McComas, and R.D. Bellian, Characteristic plasma properties during dispersionless substorm injections at geosynchronous orbit, *J. Geophys. Res.*, **102**(A2), 2309-2324, 1997

Boroyev R.N., V. A. Velichko, and D.G. Baishev, Local increase of field-aligned current intensity before a substorm onset, Proc. 5th International Conference on Substorms, St.Petersburg, Russia, 16-20 May 2000 (ESA SP-443, July 2000), p 279-282

Elphinstone, R.D. 1995. Observations in the vicinity of substorm onset: Implications for the substorm process. *J. Geophys. Res.* 100:7937-7969.

Elphinstone, R.D., J.S. Murphree, and L.L. Cogger.. What is a global auroral substorm? *Rev. Geophys.* 34:169-232. 1996

Elphinstone, R.D., Hearn, D., Cogger, L.L., Sandahl, I., Klumpar, D. and Shapshak, M. The double oval UV auroral distribution: Implications for the substorm process. Proc.of the First Int.Con.on Subs. 2:413-420, 1994.

Feldstein, Ya.I. and Starkov, G.V. Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances. *Planet.Space Sci.* 15, N 2:209-230, 1967.

Friedel R.H.W., A. Korth, G.D. Reeves and R. Belian, Origin of energetic particle injections at substorm onset as measured by the CRRES spacecraft between 4 and 7 Re and Los Alamos geostationary satellites. Proc.of the Second Int.Con.on Subs. 2:571-576, 1994.

Gladis J.B., W.E. Fransis, Distribution in the magnetosphere of O<sup>+</sup> ions from cusp/cleft ionosphere: a possible substorm trigger. *J. Geophys. Res.*, 97, A1, 123-130, 1992

Heikkila, W.J. and Pellinen, R.J., Localized Induced Electric Field within the Magnetotail, *J. Geophys. Res.*,@ 1977, vol. 82, p. 1610.

Hones, E.W., Jr., Plasma Flow in Magnetotail and Its Implications for Substorm Theories, in *Dynamics of the Magnetosphere*, Akasofu, S.-I., Ed., 1978, vol. 78, pp. 545--562.

Hultqvist, B., R. Lundin, K. Stasiewicz, L. Block, P. A. Lindqvist, G. Gustafsson, H. Koskinen, A. Bahnsen, T. A. Potemra, and L. J. Zanetti, Simultaneous observation of upward moving field-aligned energetic electrons and ions on auroral zone field lines, *J. Geophys. Res.*, 86, 9765–9776, 1988.

Iijima, T. and Nagata, T. Signatures for substorm development of the growth phase and expansion phase. *Planet.Space Sci.* 20:1095-1112, 1972.

Imhof W.L., Fine Resolution Measurements of the L-Dependent Energy Threshold for Isotropy at the Trapping Boundary. *Journal of Geophysical Research*, 1988, vol. 93, No. A9, pages 9743-9752.

Iijima, T. and Potemra, T.A. Large-scale characteristics of field-aligned current associated with substorms. *J.Geophys.Res.* 83:599, 1978.

Kamide, Y. The substorm current system: Predicting specific features. Third International Conference on Substorms (ICS-3), Versailles, France, 12-17 May 1996, ESA SP-389, 3:5-10, 1996.

Kamide Y., S. Kokubun, Two component auroral electrojet: importance for substorm studies *J.Geophys.Res.*, 101, 13027, 1996.

Kirsch, E., Krimigis, S.M., Sarris, E.T., et al., Possible Evidence for Large, Transient Electric Field in the Magnetotail from Oppositely Directed Anisotropies of Energetic Protons and Electrons, *Geophys. Res. Lett.*, 1997, vol. 4, no. 4, pp. 137--140.

Konradi A., Semar C.L., and Fritz T.A., Substorm –injected protons and electrons and the injection boundary model. *J.Geophys.Res.* 80:543-552, 1975.

Kornilova, T.A., I.A. Kornilov, Pudovkin, M.I., and O.I. Kornilov , Two types of auroral breakup, Proc. 5th International Conference on Substorms, St. Petersburg, Russia, 16-20 May, 2000, (ESA SP-443, July 2000), P. 307-311. 2000.

Kornilova, T.A., Pudovkin, M.I., and Starkov, G.V., Fine Structure of Aurorae near Polar Boundary of the Auroral Bulge during Breakup Active Phase, *Geomagn. Aeron.*, 1990, vol. 30, pp. 150--258.

Kozelova, T.V., Kozelov, B.V., and Lazutin, L.L., Substorm Large Impulsive Electric Fields Observed by CRRES, Substorm-5, St. Petersburg, 2000, p. 146.

Kozelova, T.V., Lazutin, L.L., and Kozelov, B.V., Energetic Particle Bursts before the Main Substorm Injection, *Adv. Space Res*, 2002, vol. 30, no. 7, pp. 1805--1808.

Kozelova T., L. Lazutin, B. Kozelov, N. Meredith, M. Danielides, J. Jussila, and A. Korth, Multiple-onset substorm case study: pre-onset, auroral onset and expansion Substorm-7, 2004

Kremser, G., W. Studeman, B. Wilken, G. Gloekler, D.C. Hamilton, and F.M. Ipavich, Average spatial distributions of energetic ions in the magnetosphere observed by AMPTE CCE, *J. Geophys. Res.*, **92**(5), 4459-4466, 1987.

Kremser, G., A. Korth, S. L. Ullaland, S. Perraut, A. Roux, A. Pedersen, R. Schmidt, and P. Tanskanen, Field-aligned beams of energetic electrons (16 keV  $\leq$  E  $\leq$  80 keV) observed at geosynchronous orbit at substorm onsets, *J. Geophys. Res.*, **93**, 14,453– 14,464, 1988.

Kuznetsov B.M., Troshichev O. A., On the nature of polar cap magnetic activity during undisturbed periods, *Planet. Space Sci.*, **25**, #1, 15-21, 1977

Lazutin, L.L., Kozelova, T. and Korth, A. Fast changes of energetic particle intensity near the boundary between magnetotail and trapped region during substorm activations. In: Substorm-5, St. Petersburg, edited by Wilson, A. ESA SP-443, 515-518, 2000

Lazutin, L., Borovkov, L.P., Kozelova, T.V., et al., Investigation of the Conjugacy between Auroral Breakup and Energetic Electron Injection, *J. Geophys. Res.*, vol. 105, no. A8, p. 18504.

Lazutin, L.L. X-ray emission of auroral electrons and magnetospheric dynamics, Berlin-Heidelberg: Physics and Chemistry in Space, v.14, Springer-Verlag, 1986.

Lazutin L. L. and T. V. Kozelova, The Structure of Substorm Activations in the Quasi-Trapping Region, *Cosmic Research*, Vol. 42, No. 4, 2004 p. 309-331

Lazutin L., T. Kozelova, R. Rasinkangas, A. Korth, H. Singer, J. Stadsness, S. Ullaland, K. Torkar, Radiation belt proton contribution to substorm structure and dynamics, Substorms-4, edited by S. Kokubun and Y. Kamide, pp. 547-550, Terra, Tokyo, 1998

Lazutin, L.L., R. Rasinkangas T.V. Kozelova, A. Korth, H. Singer, G. Reeves, W. Riedler, K. Torkar, and B.B. Gvozdevsky, Observations of substorm fine structure, *Ann. Geophys.*, **16**(7), 775-786, 1998a.

Lazutin, L., A. Korth, and T. Kozelova, Fast bursts of high energy protons and their role in triggering of the substorm onset instability, Sixth International Conference on Substorms University of Washington, Seattle, Washington, USA March 25-29, 340-346, 2002.

Lui, A.T.Y., Extended consideration of a synthesis model for magnetospheric substorms, In: Magnetospheric substorms, ed. by J.R. Kan et al., *Geophysical monograph*: **64**, 43-60, 1991.

Lui, A.T.Y., Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models, *J. Geophys. Res.*, **101**(A6), 13067-13088, 1996.

Lui, A.T., Lopez, R.E., et al., A Case Study of Magnetotail Current Sheet Disruption and Diversion, *Geophys. Res. Lett.*, 1988, vol. 15, pp. 721--724.

Lui, A.T., Observed Features in Current Disruption and Their Implications to Existing Theories, in *Space Plasmas: Coupling between Small and Medium Processes*, vol. 86 of Geophysical Monographs, AGU, 1995, pp. 149--162.

Lui, A.T., Particle Simulation of the Cross-Field Current Instability in a Thin Current Sheet, Sixth Intern. Conf. on Substorms, Seattle, 2002, pp. 25--32.

L. R. Lyons, I. O. Voronkov, J. M. Ruohoniemi, E. F. Donovan  
Substorms: Externally Driven Transition to Unstable State a few Minutes Before "Onset"  
ISC-6, P. 47 - 54

Maynard, N.C., Burke, W.J., Basinska, E.M., et al., Dynamics of the Inner Magnetosphere near Times of Substorm Onsets, *J. Geophys. Res.*, 1996, vol. 101, 7705-7736.

McIlwain, C. E., Auroral beams near the magnetic equator, in *The Physics of Hot Plasmas in the Magnetosphere*, edited by B. Hultqvist and L. Stenflow, p. 91, Plenum, New York, 1975.

McPherron, R.L. Growth phase of magnetospheric substorms. *J. Geophys. Res.* **75**:5592-5599, 1970.

McPherron, R.L. Substorm related changes in the geomagnetic tail: The growth phase. *Planet. Space Sci.* **20**:1521, 1972.

Mersmann, U., Baumjohann, W., Küppers, F., and Lange, K., Analysis of an eastward electrojet by means of upward continuation of ground-based magnetometer data, *J. Geophys.*, **45**, 281, 1979



Mishin, V.M., Samsonov, V.P., Popov, G.V., and Saifudinova, T.I., Three Phases of Magnetospheric Substorms and Zones of Corpuscular Injections into the Ionosphere, *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa*, no. 19, part 2, Irkutsk, 1971, pp. 31--37.

Mishin, V.M., Saifudinova, T., Bazarzhapov, A., et al., Two Distinct Substorm Onsets, *J. Geophys. Res.*, vol. 106, no. A7, pp. 13105—13118

Maezawa K., Magnetospheric convection induced by the positive and negative Z-components of the interplanetary magnetic fields: quantitative analysis using polar cap magnetic records, *J. Geophys. Res.*, 81, 2289, 1976

Ohtani, S., Earthward Expansion of Tail Current Disruption: Dual-Satellite Study, *J. Geophys. Res.*, 1998, vol. 103, no. 4, pp. 6815--6825.

Ohtani, S., Takahashi, K., Higuchi, T., Lui, A.T.Y., Spence, H.E., and Fennel, J.F., AMPTE/CCE-SCATHA Simultaneous Observations of Substorm-Associated Magnetic Fluctuations, *J. Geophys. Res.*, 1998, vol. 103, no. 3, pp. 4671--4682.

Ohtani, S., Takahashi, K., Zanetti, L.J., et al., Initial Signatures of Magnetic Field and Energetic Particle Fluxes at Tail Reconfiguration: Explosive Growth Phase, *J. Geophys. Res.*, 1992, vol. 97, pp. 9311--19324

O'Brien, B.J. Relation of the auroral zone to the magnetopause and to Van Allen radiation. In: *Space physics*, ed. by D.P. LeGalley and A. Rosen, New York, ch14, 1964

Pellinen, R.J. and W.J. Heikkila, Inductive electric fields in the magnetotail and their relation to auroral and substorm phenomena. *Space Sci. Rev.* 37, 1-61, 1984.

Pellinen, R.J. and Heikkila, W.J., Energization of Charged Particles to High Energies by an Induced Substorm Electric Field within the Magnetotail, *J. Geophys. Res.*, 1978, vol. 83, pp. 1544--1550.

Perry, C.H. et al., Statistical Survey of Dispersionless Substorm Injections Observed by the CREES MICS Ion Spectrometer, *Proc. of the Third Intern. Conf. on Substorms*, 1996, no. 3, pp. 567--572.

Pritchett, P.L. and Coroniti, F.V., The Challenge for Kinetic Simulations of Substorm Growth and Onset, *Sixth Intern. Conf. on Substorms*, Seattle, Washington, 2002, pp. 189--196.

Pudovkin, M.I., Zaitseva, S.A., Kornilova, T.A., and Pellinen, R.I., Dynamics of Aurorae in the Region of Equatorial Edge of Auroral Zone., *Geomagn. Aeron.*, 1995, vol. 35, pp. 47--54.

Rasinkangas, R., Sergeev, V.A., Kremser, G., Ulich, T., Singer, H.J. and Korth, A. Current disruption signatures at substorm onset observed by CRRES. In: *Proceedings of the Second International Conference on Substorms*, edited by Kan, J.R., Craven, J. and Akasofu, S.-I. Alaska: Geophys Inst. Fairbanks. Alaska, 1994, p. 595.

Reeves, G.D. New perspectives on substorm injections. In: *Substorm-4*, edited by Kokubun, S. and Kamide, Y. Dordrecht: Kluwer pub., 1998, p. 785-790.

Reeves, G.D., G. Kettmann, T.A. Fritz, and R.D. Bellan, Further investigation of the CDAW 7 substorm using geosynchronous particle data: multiple injections and their implications, *J. Geophys. Res.*, **97**(A5), 6417-6428, 1992.

Robert, P., Gendrin, R., Perraut, S., et al., GEOS-2 Identification of Rapidly Moving Current Structures in the Equatorial Outer Magnetosphere during Substorm, *J. Geophys. Res.*, 1984, vol. 89, no. 2, pp. 819--840.

Rostoker, G., Akasofu, S.-I., Foster, J.C., et al. Magnetospheric substorms-definition and signatures. *J. Geophys. Res.* 85:1663-1668, 1980.

Rostoker, G., S.-I. Akasofu, W. Baumjohann, Y. Kamide, and R.L. McPherron. 1987. The roles of direct input of energy from the solar wind and unloading of stored magnetotail energy in driving magnetospheric substorms. *Space Sci. Rev.* 46:93-111.

Roux, A., Perreault, P., Robert, P., et al. Plasma sheet instability related to the westward travelling surge. *J. Geophys. Res.* 96:17697-17707, 1991.

Roux, A., Generation of Field-Aligned Current Structures at Substorm Onset, *Proc. ESA Workshop on Future Missions in Solar, Heliosphere, and Space Plasma Physics*, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 30 April--3 May, 1985, ESA SP-235, p. 151.

Samson, J.C., L.R. Lyons, P.T. Newell, F. Creutzberg, and D. Xu, Proton aurora and substorm intensifications, *Geophys. Res. Lett.*, **19**(21), 2167-2170, 1992.

- Samson, J.C., MacAulay, A.K., Rankin, R., Frycz, P., Voronkov, I. and Cogger, L.L. Substorm intensifications and resistive shear flow-ballooning instabilities in the near-Earth magnetotail. Third International Conference on Substorms (ICS-3), Versailles, France, 12-17 May 1996, ESA SP-389. 3:399-404, 1996.
- Sauvaud, J.A. and Winckler, J.R. Dynamics of plasma, energetic particles and fields near synchronous orbit in the nighttime sector during magnetospheric substorms. *J. Geophys. Res.*, 85, 2043-2056, 1980.
- Shepherd, G.G., Bostrom, R., Derblom, H., et al., Plasma and Field Signatures of a Poleward Propagating Auroral Precipitation Observed at the Foot of the GEOS-2 Field Line, *J. Geophys. Res.*, 1980, vol. 85, no. 9, p. 4587.
- Starkov G., L. Lazutin, T. Kornilova, A. Soldatov, C-I. Meng, D. Sibeck, K. Liou, D. Bjordal, J. Stadsnes and G.D. Reeves, Auroral dynamics and a local structure of the isolated substorm. Proc. 5th International Conference on Substorms, St. Petersburg, Russia, 16-20 May 2000 (ESA SP-443, July 2000), p 583-586
- Untiedt, J., and Baumjohann, W., Studies of polar current systems using the IMS Scandinavian Magnetometer Array, *Space Sci. Rev.*, 63, 245, 1993.
- Vampola, A. and Korth, A., Electron Drift Echoes in the Inner Magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 1993, vol. 19, p. 625.
- Voronkov, I., R. Rankin, J.C. Samson, and V T. Tichonchuk, Shear flow instability in the dipolar magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **104**(A8), 17323–17334, 1999.
- Voronkov I.O., E. F. Donovan, P. Dobias, J. C. Samson, and L. R. Lyons Near-Earth Breakup in Substorms: Empirical and Model Constraints ISC-6. P. 270-277. 2002
- Voronkov, I., Rankin, R., Frycz, P., @et al., Coupling of Shear Flow and Pressure Gradient Instabilities, *J. Geophys. Res.*, 1997, vol. 102, no. 5, pp. 9639--9650.
- Winckler, J.R., Peterson, L., Arnoldy, R.L., and Hoffman, R.A., X-Rays from Visible Aurorae at Minneapolis, *Phys. Rev.*, 1958, vol. 110, pp. 1221--1231.
- Weiss L.A., P.H. Reiff, R.V. Hilmer et al., Mapping the Auroral Oval into the Magnetotail using Dynamics Explorer Plasma Data, *J. Geomag. Geoelectr.*, 1992. V.44. P. 1121-1144.