

## Суббуря 12.03.1991. Часть 2. Авроральные электроны. Ускорение, инжекция и динамика.

Лазутин Л.Л.<sup>1</sup>, Козелова Т.В.<sup>2</sup>, Мередит Н.<sup>3</sup>, Даниелидис М.<sup>4</sup>, Козелов Б.В.<sup>2</sup>, Юссила Дж.<sup>4</sup>, Корт А.<sup>5</sup>

<sup>(1)</sup> НИИЯФ МГУ Email: [lazutin@srd.sinp.msu.ru](mailto:lazutin@srd.sinp.msu.ru)

<sup>(2)</sup> Полярный Геофизический институт КНЦ РАН

<sup>(3)</sup> Британская Антарктическая Служба, Кембридж, Великобритания

<sup>(4)</sup> Университет Оулу, Финляндия

<sup>(5)</sup> Институт Макса-Планка, Линдау, Германия

**Абстракт.** В первой части исследования суббури 12 03 1991г. была рассмотрена пространственно-временная структура возмущения и динамика авроральных ионов. Во второй части проводится анализ измерений авроральных электронов на спутнике CRRES. Показано, что возрастания потока электронов во время локальной и крупномасштабной инжекции электронов определяются сочетанием продольного, индукционного и бетатронного механизмов ускорения с эффектом смещения дрейфовых оболочек частиц. Определен относительный вклад этих механизмов в зависимости от энергии авроральных электронов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследованию спектральных и пространственно-временных характеристик авроральных электронов во время суббури посвящены многочисленные исследования (см. например, [1] и цитируемую литературу).

Электронная популяция в магнитосфере разнообразна и по энергетическим характеристикам, и по областям обитания, и по происхождению. К авроральным электронам относятся популяции хвоста магнитосферы и области квазизахвата, имеющие отношение в узком значении к полярным сияниям, и в широком - к суббуревым возмущениям в целом.

В зоне квазизахвата, в которой развиваются исследуемые нами процессы суббури, авроральные электроны делятся на две группы – низкоэнергичные (< 10 кэВ) и энергичные - от десяти до нескольких сот кэВ. Низкоэнергичные обычно именуется электронами плазменного слоя (plasma sheet electrons) и в свою очередь делятся на мягкие и жесткие, первые ассоциируются с периферийным или програничным плазменным слоем (boundary plasmashet) хвоста магнитосферы, вторые - с центральным плазменным слоем, ЦПС (central plasma sheet). ЦПС принято рассматривать как часть единого плазменного слоя хвоста, но по нашему мнению следует отделять ЦПС от хвостовой части и по расположению внутри области квазизахвата, и по характеристикам составляющих его частиц, электронов и ионов. Электроны ЦПС присутствуют и в спокойных условиях, а во время возмущений их потоки резко усиливаются, вызывая полярные сияния. Усиление связано с ускорением в продольных электрических полях, области и

механизмы ускорения локализованы, динамичны и разнообразны, как разнообразны формы полярных сияний.

Энергичные авроральные электроны, первоначально обнаруженные и изученные с помощью аэростатов, а затем и с помощью спутников, появляются на фоне электронов радиационного пояса во время возмущений примерно (с точностью до минут) в той же области и те же времена, что и возмущенные потоки низкоэнергичных электронов. Более точное соотношение динамики этих двух ветвей авроральных электронов пока изучено плохо. Ускорение энергичных электронов чаще всего объясняется инжекцией - переносом частиц радиально к Земле из хвоста в область более сильного магнитного поля и, соответственно, с бетатронным ускорением. Равным по популярности является механизм ускорения индукционным полем, кроме того, предлагались различные идеи ускорения в переменных полях, например, на гребне движущейся к Земле ударной волны.

Можно полагать, что основные механизмы ускорения авроральных частиц хорошо обозначены теоретически, однако нельзя сказать, что они успешно соотнесены с экспериментом. Суббуревая активность столь многообразна, что для подтверждения любой концепции можно подобрать наблюдательный материал. При этом всегда допускаются упрощающие предположения и остаются, отодвигаются в сторону как второстепенные, факты, не вписывающиеся в рассматриваемую модель.

В настоящей работе представлен анализ крупномасштабной динамики авроральных электронов во время суббури, в котором наглядно и

однозначно стыкуются результаты измерений с физическими представлениями о происходящих процессах, по крайней мере для энергичной компоненты. Кроме того, мы представляем некоторые выводы о связи динамики энергичных и низкоэнергичных электронов во время суббури и активизаций.

## 2. ИЗМЕРЕНИЯ

В первой части работы [2] было показано, что подготовительная фаза суббури 12 марта 1991г началась около 2015 UT, начало активной фазы – 2026 UT и крупномасштабная экспансия к полюсу – 2030 UT. Положение проекции спутника на границу атмосферы было показано на рис 2, усредненные за 30с измерения энергичных частиц и магнитного поля, приведены на рис 8 первой части работы. Там же в таблице 2 даны диапазоны энергий каналов датчика энергичных частиц и другая информация об измерительной аппаратуре спутника.

Характер временных вариаций регистрируемых детекторами энергичных электронов, показанный на указанном рисунке, типичен для измерений на геостационарных спутниках во время суббури в долготном секторе, охваченном возмущением. Регистрируется спад потока частиц на подготовительной фазе из-за радиального смещения дрейфовых оболочек «старых», захваченных электронов, который сменяется быстрым ростом потока во время диполизации магнитного поля. На фоне этих крупномасштабных вариаций регистрируются кратковременные всплески потока электронов, наиболее резкие в момент, когда спутник оказывается на силовых линиях области локальной активизации. В нашем случае такая локальная активизация на долготе спутника наблюдалась в 2047 UT.

Сводный график временных вариаций электронов, измеренных спектрометром LEPA на борту спутника CRRES приведен на рисунке 1. Сплошной линией дан поток захваченных электронов, пунктиром – продольные потоки. В нижней секции приведены данные двух каналов детектора энергичных частиц EPAS. Цифрами обозначены четыре временных интервала суббури, анализ которой приведен в предыдущей работе. Нулевой интервал – последние минуты до брейккапа, первый и второй – до начала и во время глобальной диполизации, третий – интервал сдвига WTS к западу и локальной активизации на меридиане спутника CRRES. В зависимости от энергии, популяции электронов ведут себя по разному – в диапазоне от 100 эВ до нескольких кэВ поток подрастает на этапе 0, мало меняется на 1м и спадает во время диполизации. Этот спад очевидно связан с общим ростом температуры электронов, с появлением возмущенных потоков авроральных

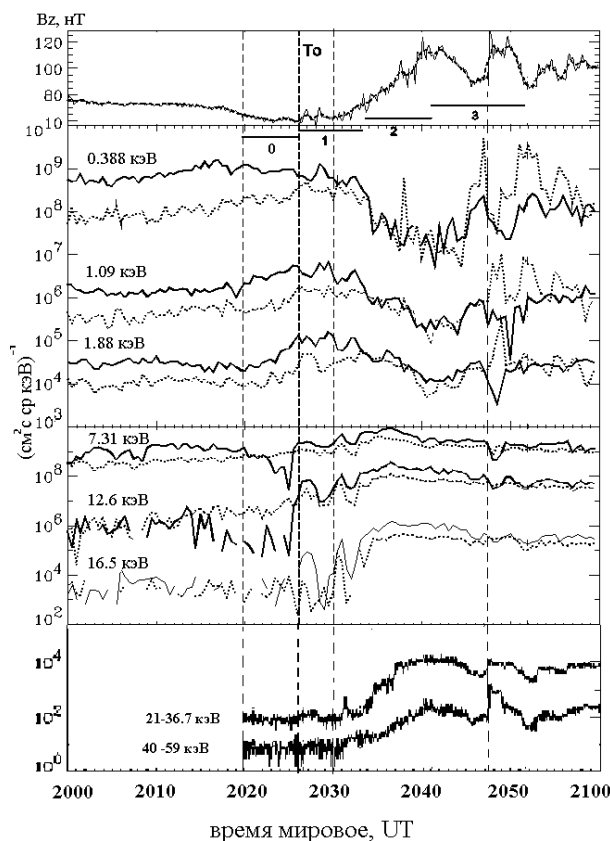


Рис 1.  $B_z$  – компонента магнитного поля и потоки электронов, измеренные на спутнике CRRES. Сплошные линии – потоки захваченных электронов, пунктир – потоки вдоль силовой линии. Вертикальные пунктирные линии отмечают начало подготовительной и активной фазы, диполизации магнитного поля и локальной активизации на меридиане CRRESa.

электронов ЦПС, составляющий вторую популяцию до энергии порядка 20 кэВ. Здесь мы наблюдаем большие вариации интенсивности с результирующим ростом к началу диполизации на 1-2 порядка. И, наконец, третья популяция, свыше 20 кэВ, представляет собой классическую картину инжекции – рост с началом диполизации магнитного поля и резкий всплеск во время локальной диполизации.

Отличается иpitch-угловое распределение электронов в разных энергетических группах. В области низких и средних энергий устойчивое захваченное распределение на первых двух этапах сменяется изотропным с наложением всплесков продольных потоков электронов с энергией ниже 5 кэВ.

Рассмотрим сначала подробнее поведение второй и третьей популяции, т.е. энергичных авроральных электронов и электронов ЦПС во время диполизации магнитного поля или крупномасштабной экспансии суббури.

## 2.1 Диполизация

На рис 2 приведены измерения магнитного поля и нескольких каналов энергичных электронов; тонкими прямыми линиями выделено несколько трендов роста магнитного поля и потоков электронов. Первый CRRES 560, 12.03,1991

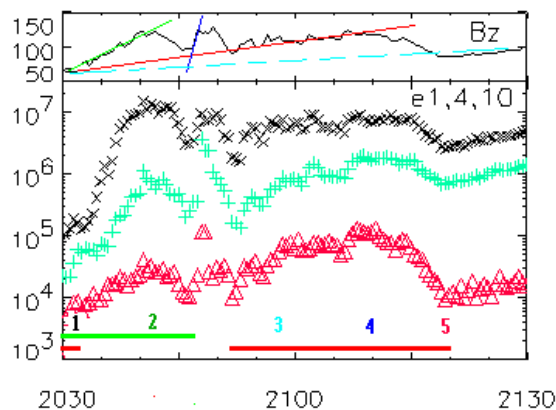


Рис 2. Синхронность быстрых и медленных трендов в магнитном поле и потоках энергичных электронов

тренд отражает рост потока электронов во время диполизации, второй – локальную активизацию и два протяженных тренда – рост частиц и поля за весь активный период. Первичным, лидирующим в этой тесной связи является магнитное поле, так как в отличие от ионов электроны замагничены, сравнительная плотность энергии электронов невелика.

На рис 3 показана последовательность энергетических спектров электронов, измеренных детектором EPAS; первый спектр отражает спектр захваченных электронов радиационного пояса, авроральных электронов здесь еще нет. В последующие моменты, указанные на вставке, появляются свежееускоренные электроны, суммарный спектр последовательно смягчается. Откуда берутся эти электроны, видно из рис 4, представляющего аналогичный график для мягких электронов, измеренных детектором LEPA.

Здесь также первая кривая демонстрирует начальный спектр характерный для электронов центрального плазменного слоя. [3]. Максимум наблюдается около 0.4 кэВ со степенным характером спада

$(N = E^k)$  где  $k \sim 1$  в диапазоне 1 - 7 кэВ и  $k \sim 9$  от 7 до 15 кэВ. В области более высоких энергий наблюдается переход к пологому спектру захваченных электронов радиационного пояса с  $k \sim 0.6$ . Пунктирной линией показаны измерения энергичных электронов детекторами EPAS, которые хорошо стыкуются с данными детектора LEPA.

Следующие четыре спектральные кривые демонстрируют процесс быстрой энергизации электронов плазменного слоя, в течении 6-10 минут происходит их превращение, переход в популяцию энергичных авроральных электронов. Каждая

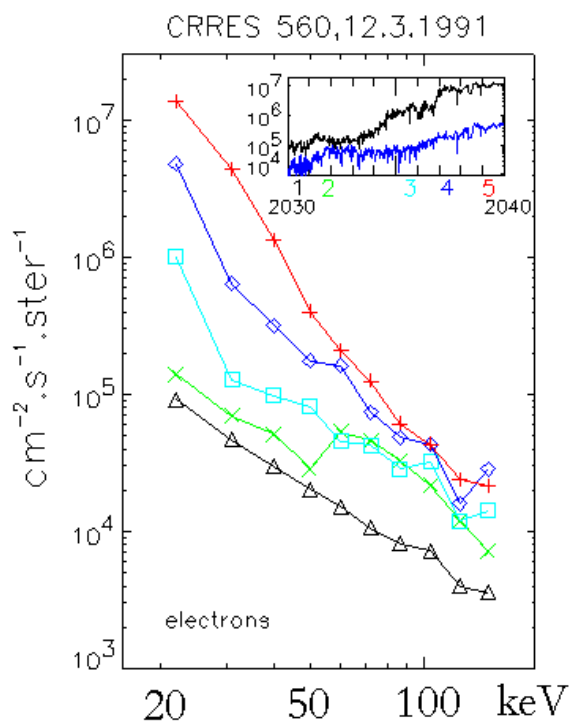


Рис 3. Динамика энергетического спектра энергичных электронов во время крупномасштабной диполизации. Моменты измерения спектров обозначены на вставке.

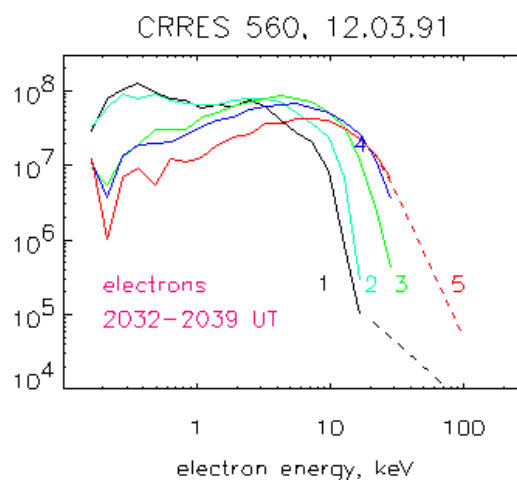


Рис 4. То же, что на Рис 3 для электронов ЦПС

последующая кривая получается из предыдущей сдвигом вдоль оси энергий. На последней кривой вновь, как и на первой, пунктирная линия продлевает спектр в область высоких энергий, демонстрируя, что спектральные кривые рисунков 3 и 4 прекрасно стыкуются.

Процесс ускорения авроральных электронов может быть однозначно объяснен хорошо известным бетатронным ускорительным механизмом. Перпендикулярная энергия частицы изменяется пропорционально соотношению напряженности магнитного поля в начальной и конечной точке

траектории,  $W1/W2 = B1/B2$ . С 2032 до 2037 UT энергия электронов возрасла вдвое, как видно из сдвига падающего участка спектра на рис 4. В то же время  $Bz$  в окрестности CRRES изменилась примерно с 65 до 110 нТ. Разумно увеличить отношение  $B1/B2$  в нужную сторону можно просто, если учесть, что направленное на вечер электрическое поле конвекции сдвигает частицы к Земле.  $E \times B$  дрейф с уровня 55 нТ расположенного примерно на  $0.5 R_e$  от спутника в антисолнечном направлении, дает необходимое соотношение.

Таким образом, наименование «инжекция» оказывается в какой-то степени оправданным, однако с существенной поправкой – инжекция происходит не из хвоста магнитосферы, а из близких оболочек области квазизахвата.

## 2.2 Локальная суббуревая активация

Как было сказано выше, одна из активизаций суббури, ближе к концу экспансии, произошла на меридиане спутника CRRES в 2043-2049 UT. Как выявил анализ магнитных данных, это была активизация типа WTS, т.е. западный фронт сектора, охваченного суббурей, ориентированный в северо-южном направлении скачком сместился на Запад и активизировался в процессе смещения. В результате и на приполюсной части изгиба магнитная станция Ян Майен зарегистрировала бухтообразное возмущение, и на приэкваториальной части, куда проектируется силовая линия на которой располагался CRRES, наблюдались возмущения, к описанию которых мы приступаем.

Перечислим основные детали процесса активизации, измеренные на спутнике:

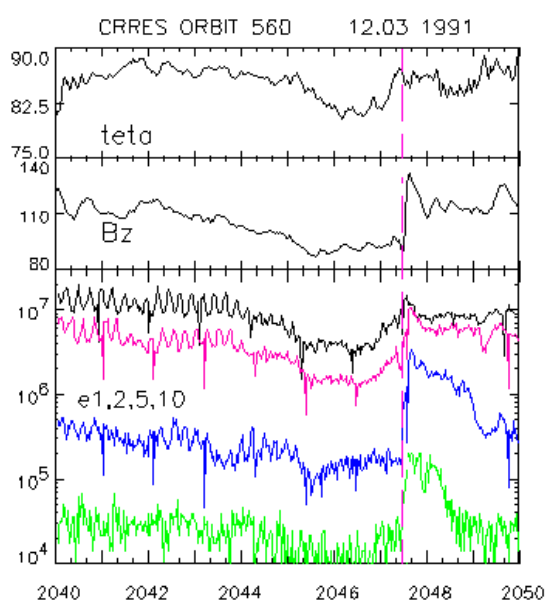


Рис 5. Временной ход магнитного поля и потоков частиц во время локальной активизации.

1. Силовые магнитные линии вытягиваются в хвост начиная с 2042 UT за счет уменьшения  $Bz$ -компоненты (Рис 5). Эта мини-подготовительная фаза сопровождается уменьшением потока энергичных электронов, на рисунке видны также неглубокая модуляция потока с периодом порядка минуты. В 2045 UT спад прекращается, и наклон силовых линий восстанавливается до  $85^\circ$ .

2. В 2047:30-:40 происходит резкий рост  $Bz$  (от 80 до 130 нТ за 5 секунд) и потока энергичных электронов (на порядок за 10-15 с).

3. Поток ионов начинает расти на мини-подготовительной фазе одновременно с уменьшением  $Bz$ . На рис 9 в работе (1) видно, как растет плотность энергии частиц с примерно равным вкладом ионов в диапазоне энергий 0.1-15 кэВ и 70-600 кэВ. В конце этого периода плотность энергии частиц вдвое превышает плотность энергии магнитного поля.

4. Во время развития неустойчивости плотность энергии частиц падает столь же быстро как и растет магнитное поле. Сравнение потока ионов приходящих из разных направлений указывает на существование больших пространственных градиентов плотности частиц. Мы не проводим подробного анализа этого эффекта, поскольку период оборота спутника 30с существенно больше длительности неустойчивости, и картина неизбежно будет смазана, но сам факт наличия градиентов плазменного давления полагается определяющим для развития суббуревой активности [4].

5. Напряженность электрического поля, измеренная на спутнике, была максимальна в этом интервале времени, во всех трех компонентах электрометра регистрируется зашкал ( $>10$  мВ/м).

Рассмотрим теперь подробнее динамику электронов. На рис 6 показано, как меняется питч-угловое распределение электронов по измерениям на детекторе LEPA. Вновь мы видим разницу в поведении электронов с энергиями 0.1-1 кэВ, 1-5 кэВ и 20-100 кэВ, и первое, что бросается в глаза, это появление потоков самых низкоэнергичных электронов вдоль силовых линий в 2045:20 - 2047:00, во время вытягивания в хвост силовых линий магнитного поля UT и роста давления, затем после перерыва в 2048:45-2049 UT. На рис 1 мы видим этот продольный поток в канале 0.388 кэВ.

Во время перерыва наблюдается быстрое возрастание потока продольных электронов уже в интервале 1-3 кэВ, типичные энергии электронов, вызывающих активные формы полярных сияний. Кроме того, на тот же интервал приходится процесс диполизации и ускорения энергичных электронов 50-100 кэВ.

Некоторые из приведенных на рис 5 питч-угловых распределений дают симметричный поток вытекающих и втекающих в ионосферу электронов,

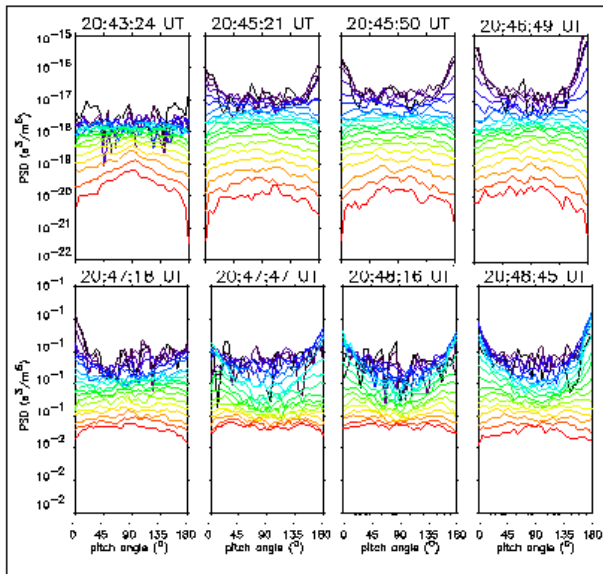


Рис 6. Питч-угловое распределение электронов с энергией 0.1 – 20 кэВ во время локальной активизации

другие несимметричны, и в этих случаях можно говорить о появлении продольного тока.

Таким образом, складывается такая логическая последовательность: 1- рост плотности энергии ионов плюс появление продольных потоков низкоэнергичных электронов и затем 2 - всплеск продольных электронов кэВных энергий, взрывная локальная диполизация магнитного поля, ускорение энергичных электронов и резкое падение плотности энергии частиц.

На рис 7 представлены спектры энергичных электронов во время локальной активизации. Видно явное отличие от аналогичной по форме представления картины бетатронного ускорения электронов во время крупномасштабной диполизации. Там наблюдалось последовательное смягчение энергетического спектра, здесь наблюдается преимущественное ускорение электронов в ограниченном (50-100 кэВ) интервале энергий. Кроме того, весь процесс занимает здесь порядка 10с и сопровождается большим изменением магнитного поля  $\partial B/\partial t$ , что указывает на ускорение в индукционном магнитном поле.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Потоки электронов и ионов играют существенно разную роль в процессах суббури активной. Ионы управляют изменением структуры авроральной магнитосферы, поскольку являются основным носителем суббуревых дрейфовых токов, рост плотности энергии ионов и пространственной неоднородности плазменного давления создают условия для развития начальной взрывной неустойчивости суббури и ее повторений в процессе экспансии. Электроны не влияют на

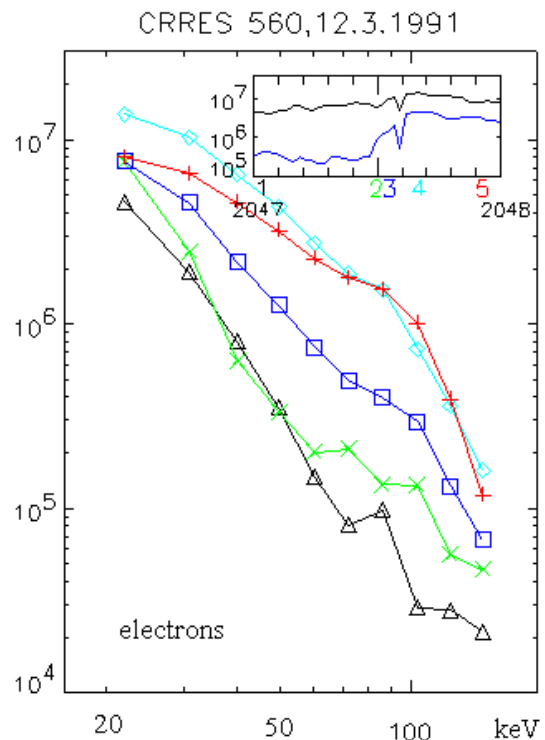


Рис 7. Динамика энергетического спектра энергичных электронов во время локальной активизации

крупномасштабную структуру магнитосферы, но, ускоренные в процессе суббури, они поддерживают существование внешнего радиационного пояса и отвечают за целый ряд значимых процессов суббури, таких как полярные сияния, ионосферное поглощение радиоволн, авроральный электроджет и трехмерный токовый клин суббури, тормозное рентгеновское излучение, всплески ОНЧ и т.д. Не удивительно, что почти одновременные возрастания, инъекции электронов и ионов оказываются при детальном рассмотрении процессами различными по пространственно-временной структуре и природе.

Для авроральных электронов с энергией выше десятка кэВ основным фактором, определяющим их динамику, является магнитное поле, вмороженность, дрейфовый характер движения, пусть и не всегда с сохранением адиабатических инвариантов.

Связь между изменением магнитного поля и ростом интенсивности энергичных электронов во время относительно медленной крупномасштабной диполизации определяется двумя базовыми процессами. Один процесс - это бетатронное ускорение, о котором мы говорили в предыдущем разделе. Результирующая энергия частицы определяется напряженностью магнитного поля в конечной точке траектории частицы; радиальная смещение определяется  $E \times B$  дрейфом, где электрическое поле есть сумма индукционного и конвективного электрического поля. Смещение, как



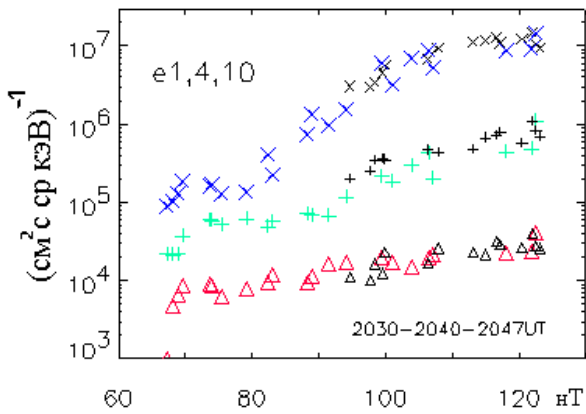


Рис 8. Зависимость потока электронов от величины  $Bz$  на ветвях подъема и спада интенсивности для тренда 2030-2040 UT. Черные значки-обратный ход.

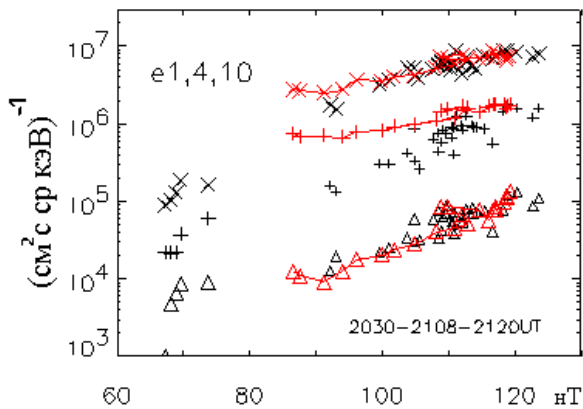


Рис 9. То же самое для долговременного тренда. Красные значки –обратный ход.

показано выше, было небольшим и ограничивалось пределами области квазизахвата.

Второй процесс, меняющий регистрируемую спутником интенсивность электронов - это радиальное смещение дрейфовых оболочек. На подготовительной фазе дрейфовые оболочки смещаются к Земле и спутник регистрирует падение интенсивности, поскольку градиент электронной плотности на склоне радиационного пояса направлен к Земле. А во время диполизации происходит обратное движение оболочек магнитного дрейфа, наблюдается возрастание интенсивности. Если смещение происходит медленно по сравнению с периодом дрейфа вокруг Земли, третий адиабатический инвариант сохраняется, и энергия частиц не меняется.

На рис 2 в двух трендах после возрастания магнитного поля наблюдается обратный ход, уменьшение напряженности магнитного поля, что позволяет сопоставить характер зависимости потока

электронов от напряженности магнитного поля на ветви роста и на ветви спада.

На рис 8 показана такая зависимость для интервала диполизации 2030-2040 UT и последующих минут уменьшения  $Bz$  для трех энергетических каналов электронов. Видно, что поток энергичных возвращается к прежнему значению при уменьшении поля, тогда как в низких энергиях виден гистерезис, свидетельствующий об ускорении частиц.

Еще более четко этот эффект виден на примере длинного тренда, охватывающего большую часть активной фазы суббури. Рост напряженности магнитного поля происходит от 2030 до 2108 UT, спад - 2108-2120 UT.

Энергичные электроны и в этом случае не ускоряются, значительный остаточный ускоренный поток электронов остается для энергий ниже 90 кэВ.

Складывается представление о суперпозиции двух процессов, определяющих рост потока электронов во время суббури диполизации, которое иллюстрируется рис 10. Низкоэнергичные электроны дрейфуют медленно и на весь период суббури экспансии остаются в активном секторе, претерпевая бетатронное ускорение. Электроны больших энергий будут проскакивать активную область почти без ускорения, но дрейфовые оболочки будут смещаться, если раньше спутник регистрировал частицы, приходящие из точки 1, теперь к нему приходят электроны из точки 2, расположенной ближе к максимуму радиационного пояса. Этот эффект будет определяющим для регистрируемых спутником вариаций потока электронов высоких энергий, чем и объясняется отсутствие гистерезиса на графиках рис 8 и 9. Верхний предел энергии свежееускоренных авроральных электронов в нашем случае составлял 90 кэВ, но в более мощных суббурих может достигать нескольких сот кэВ, в частности это следует из аэролатных измерений аврорального рентгеновского излучения.

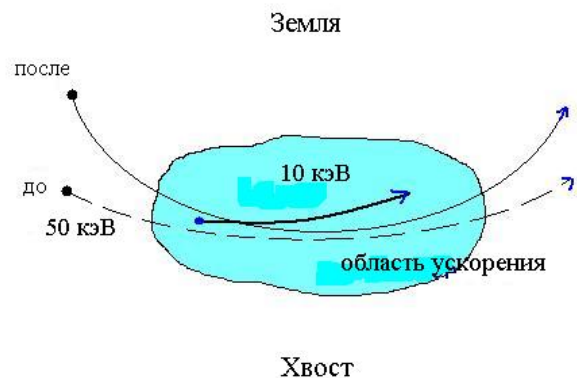


Рис 10. Схема динамики электронов во время диполизации

Для электронов с энергией выше 300-700 кэВ суммарные потери вследствие питч-углового рассеяния становятся более эффективными, нежели

ускорение, и на геостационарных спутниках во время больших суббурь и магнитных бурь регистрируется быстрый спад интенсивности с последующим медленным, в течении нескольких дней восстановлении за счет радиальной диффузии на магнитных импульсах [5].

Переходя к анализу результатов измерений во время локальной активизации, согласимся с тем, что и изложить достаточно четко картину происходящего и выделить какой-либо яркий новый результат довольно трудно. Возрастания энергичных электронов с набором интенсивности в несколько секунд одновременно с быстрым ростом  $V_z$  наблюдались и раньше. Измеренный энергетический спектр не подтвердит сколько-либо обоснованным модельным расчетом, поскольку мы не знаем геометрии активизации и следовательно, структуры индукционного поля. С измерением в одной точке это сделать невозможно. Единственный обоснованный вывод можно сделать об ускорении электронов именно индукционным полем; наличие продольных токов, градиентов давления плазмы, наконец сама изменчивость, скачек магнитного поля является достаточным свидетельством этому.

Для низкоэнергичных авроральных электронов сам факт регистрации продольных потоков не является новым, после того, как они были зарегистрированы МакИлвайном в 1075 году [6], появилось много измерений на разных спутниках и ракетах [7-9]. На том же спутнике CRRES Абель и др. [10] обнаружили значительное разнообразие типов продольных электронных потоков как в спокойное, так и в возмущенное время. Сложная временная структура продольных высыпаний не удивительна, прямое подтверждение мы видим в многообразии форм полярных сияний. Спокойные дуги, лучистые дуги и драпри, активные формы электронных сияний - все это вызывается продольными потоками электронов с энергией от сотен эВ до десятка кэВ. Пожалуй только некоторые формы диффузных сияний и пульсирующих

пятен обязаны сбросу энергичных электронов. Таким образом, не сам факт регистрации продольных потоков электронов вызывает интерес, а та выстроенность, последовательность событий перед и во время локальной активизации. До начала взрывной неустойчивости мы видим рост потоков и давления плазмы (ионов) одновременно с появлением продольных потоков электронов малых энергий. Затем регистрируется с нарастающей скоростью появление продольных потоков электронов кэВных энергий, за ним - всплеск энергичных электронов, рост  $V_z$  и спад плазменного давления. Разумеется типичность, логическая закономерность такой последовательности событий должна быть подтверждена еще и еще раз, однако она не противоречит представлениям об образовании локальной динамической структуры типа токового клина с генерацией сильных индукционных полей с

геометрией подобной меандру Хейкилла-Пелиннена [11]).

В первой части нашего исследования мы обращали внимание на тот факт, что возрастания авроральных ионов в начале суббури совпадали с всплесками сияний, вихревыми локализованными активизациями. Так как CRRES тогда находился к западу от эпицентра возмущений, регистрируются только энергичные ионы, продольных потоков электронов мы не видим, хотя уверены, что они там должны быть. Локальная активизация 2047UT находится вне поля зрения наземных камер полярных сияний, однако нет сомнения, что вспышка сияния сопровождала и здесь рост потока ионов. Мы рассматриваем эту закономерность, это совпадение, как указание, в каком направлении надо искать механизм подготовки взрывной активизации суббури. Только указание, потому что из-за медленного вращения спутника (30с) нет необходимого временного разрешения распределения потока частиц по питч-углам, электрического поля, и вообще одноточечное измерение не позволяет нарисовать конкретную картину.

Вместе с тем, идеи об определяющей роли неравновесного распределения давления плазмы в области квазизахвата на развитие суббури, излагаемые в частности в работах Антоновой [4] вызывают все большее внимание. Полученные нами результаты находятся в русле этих идей. Отметим только, что говоря о плазменном давлении надо учитывать не только собственно плазму ЦПС, но и существенный, а иногда и определяющий вклад энергичных квазизахваченных ионов.

#### 4. ВЫВОДЫ

Во время суббури 12 марта 1991г. мы исследовали возрастания авроральных электронов в широком диапазоне энергий во время локальных активизаций и крупномасштабных перестроений магнитосферы.

1. Во время суббуревой активизации спутник, расположенный в той же локальной силовой трубке, регистрирует следующую очередность событий: рост давления плазмы одновременно с появлением продольных потоков электронов малых энергий. Затем регистрируется появление продольных потоков электронов кэВных энергий, всплеск энергичных электронов, рост  $V_z$  и резкое падение плазменного давления. Ускорение энергичных электронов наиболее логично приписать индукционному электрическому полю. Характерное время скорения – секунды, первые десятки секунд.

2. Отдельные локализованные акты ускорения энергичных электронов суммируются с крупномасштабным ускорением бетатронного типа вызванным ростом магнитного поля во время экспансии суббуревой активности. Характерное

время ускорения – несколько минут, до 10-15 минут, за это время кэвные электроны ЦПС переходят в класс квазизахватенных энергичных электронов. Крупномасштабного электрического поля западного направления дает дополнительный вклад в ускорительный процесс.

3. Возрастание электронов больших энергий (>90-500 кэВ) носит обратимый характер и объясняется смещением дрейфовых оболочек к Земле во время подготовительной фазы и от Земли – во время диполизации магнитного поля.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны наблюдателям и научным сотрудникам, обеспечившим наземные наблюдения магнитного поля и полярных сияний на полярных обсерваториях ПГИ, ААНИИ, сети IMAGE и SAMNET (Унив. Ланкастера).

Данные измерений пульсаций Pi2 были предоставлены Др. С.В. Анисимовым.

Авторы благодарны группам CRRES за возможность использовать данные по частицам и магнитному полю. Работа ТВК и БВК была поддержана РФФИ (ДПС-18).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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
2. Лазутин Л.Л., Козелова Т.В., Мереди Н., Даниелидис М., Козелов Б.В., Юссилла Дж., Корт А., Суббурия 12.03.1991. Часть 1. Структура суббуриевой активности и авроральные ионы. Наст. номер..

3. 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.

4. Антонова Е.Е. Равновесие плазмы в магнитосфере Земли и ускорительные процессы в высоких широтах, Диссертация на соискание степени доктора физ.-мат. наук, НИИЯФ МГУ, 2005

5. Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М. Наука, 1968, 223 с.

6. 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.

7. Klumpar, D. M., Statistical distributions of the auroral electron albedo in the magnetosphere, *Auroral Plasma Dynamics*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 80, edited by R. L. Lysak, pp. 163– 171, AGU, Washington, D. C., 1993.

8. 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.

9. 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.

10. Abel, G. A., A. N. Fazakerley, and A. D. Johnstone, The simultaneous acceleration and pitch angle scattering of field-aligned electrons observed by the LEPA on CRRES, *J. Geophys. Res.*, 107, XXXX, doi:10.1029/2001JA005090, 2002.

11. 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.