

Инжекция релятивистских электронов во внутреннюю магнитосферу во время магнитных бурь: связь с суббурями

Л.Л. Лазутин

Научно исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,  
Московского Государственного университета им. М.В. Ломоносова, Россия

e-mail: [III@srd.sinp.msu.ru](mailto:III@srd.sinp.msu.ru)

Поступила в редакцию:

#### Аннотация

По измерениям энергичных электронов на низковысотном спутнике *SERVIS-1* впервые исследована связь быстрых возрастаний интенсивности электронов с энергией  $>0.3$  МэВ с магнитосферными суббурями. Наряду с известным процессом радиальной диффузии, регистрируемой на фазе восстановления, измерены возрастания за время не больше 1.5 часов на главной фазе шести магнитных бурь в канале 0.3-1.7 МэВ и в трех из них — в канале 1.7-3.4 МэВ. Анализ магнитограмм авроральной зоны показал, что возрастания происходят в момент активизации магнитосферной суббури. Сделан вывод, что возрастания вызываются радиальной инжекцией электронов импульсным электрическим полем, индуцированным во время суббуревых активизаций. Показано, что импульсная инжекция является одним из основных механизмов пополнения электронных радиационных поясов во внутренней магнитосфере и в сочетании с умеренной радиальной диффузией отвечает за появление в магнитосфере после магнитных бурь больших потоков энергичных электронов («киллеров»).

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Динамика электронов радиационных поясов земли во время магнитных бурь управляется процессами переноса, ускорения и потерь. Хотя основные процессы известны, исследованы теоретически, проведено компьютерное моделирование [см., обзоры Friedel et al. 2002; Antonova et al., 2009; Spritz et al., 2008, 2008a], в сложном сочетании этих процессов, к тому же индивидуальном для каждой конкретной бури, проблема определения значимости каждого процесса остается нерешенной. Особенно важной, в частности и для прикладных задач космической погоды, является проблема ускорения релятивистских электронов, большие потоки которых, появляясь во время магнитных бурь, наносят ущерб электронике космических аппаратов.

Ускорение электронов можно объяснить во-первых, резонансным взаимодействием с ОНЧ-излучениями [Summers et al., 1998, 2002; Horne et al., 2007; Thorne et al., 2007] и циклотронным ускорением при попадании частицы в область с более высокой напряженностью магнитного поля, что обычно происходит при радиальном переносе частиц к Земле. Способов переноса несколько, отличающихся как скоростью переноса, так и механизмами, его вызывающим.

Медленная радиальная диффузия, ответственная за формирование структуры радиационных поясов, была исследована еще в начале космической эры [Тверской, 1968; Редерер, 1972; Lyons and Thorne, 1973]; она происходит в спокойное время под действием импульсов давления солнечного ветра. Во время магнитных бурь неоднократно регистрировался перенос электронов с повышенной скоростью, с характерным временем

от десятка часов до нескольких дней [см. обзор Кузнецов и Тверская, 2007]. В качестве механизма этой диффузии с умеренной скоростью называется резонанс на частотах магнитного дрейфа с пульсациями магнитного поля типа Pc5 [Lanzerotti et al., 1970; Elkington et al., 1999, 2003; Loto'aniu et al., 2006], частота появления и амплитуда которых резко возрастает во время магнитных возмущений.

Третий, самый быстрый тип переноса – это сдвиг, инжекция, единичным импульсом. Классическим примером быстрой инжекции является эффект заброса протонов и электронов во внутреннюю магнитосферу импульсом SC в начале магнитной бури 24 марта 1991 г., зарегистрированный спутником CRRES [Li et al., 1993; Павлов и др., 1993]. Инжекция SC может наблюдаться и во внешних дрейфовых оболочках, в авроральной магнитосфере, приводить к усилению и сбросу в ионосферу энергичных электронов, вызывая полярные сияния и процессы в ионосфере внешне похожие на суббури [Лазутин и Кузнецов, 2008]. Наконец широко известный процесс инжекции наблюдается в начале суббури, во время активизации, когда при диполизации магнитного поля генерируется импульс индукционного электрического поля, который ускоряет авроральные электроны и протоны, забрасывая из на более близкие к Земле оболочки [Лазутин, 2007]. При этом растет не только поперечная энергия частиц из-за сохранения магнитного момента, но и продольная энергия, связанная с сохранением второго адиабатического инварианта. Поскольку суббуревая активность во время магнитных бурь велика, можно полагать, что инжекция энергичных электронов происходит и во время магнитных бурь, но вот будет ли она ограничена внешними дрейфовыми оболочками или возможна и на внутренних оболочках, пополняя радиационный пояс? В том, что продолжительная суббуревая активность на фазе восстановления магнитной бури приводит к ускорению электронов внешнего пояса хорошо известно [Obara et al., 2000; O'Brien et al., 2003; Meredith et al., 2002; Lyons et al., 2005].

Примеры быстрой инжекции электронов во время бури приводились в ряде работ, в частности [Baker et al., 2004; Vassiliadis et al., 2005; Nagai et al., 2006]. Horne and Thorne [2003] полагали, что ускорение электронов с энергией 100-300 кэВ при взаимодействии с ОНЧ хорамы может занимать всего несколько часов, и, следовательно, объяснить быстрые возрастания и заполнение провала во время главной фазы бури. Большинство других публикаций оценивают характерное время ускорения ОНЧ-волнами на порядок выше. В работе [Nagai et al., 2006] приводятся два случая быстрого возрастания электронов в области провала между поясами и высказывает предположение, что ускорение может быть вызвано диполизацией магнитного поля во время суббури, однако анализа суббурь в этой работе не было сделано. В работе [Nose et al., 2010] были обнаружены случаи диполизации магнитного поля ( $>20$  нТл за 5 минут) вплоть до  $L=3.5$  во время брейкапа суббури.

Таким образом, хотя эффект быстрой инжекции электронов во внутренней магнитосфере во время магнитных бурь был обнаружен ранее, но его характеристики, связь с динамикой магнитосферы во время бурь исследована слабо а связь с суббуревой активностью не исследовалась вовсе.

В данной работе по данным спутника SERVIS-1 выделены нескольких быстрых (не более 1.5 часа) возрастаний энергичных электронов во внутренней магнитосфере во время магнитных бурь и проведен анализ связи с суббуревой активностью. Особенности динамики частиц на внешних оболочках ( $L=5$ ), дропауты на вечернем секторе, возрастания на утреннем и др. будут рассмотрены в отдельной работе.

## **2. ИЗМЕРЕНИЯ**

В работе использованы измерения энергичных электронов в каналах 0.3-1.7 и 1.7-3.4 МэВ

спектрометра LPD, установленного на низковысотном японском спутнике с полярной орбитой SERVIS-1 (Space Environment Reliability Verification Integrated System), высотой 1000 км, запущенном с полигона Плесецк 30.10. 2003, и стабилизированном по Солнцу в плоскости утро-вечер. Данные спектрометра были предоставлены в наше распоряжение профессором Н. Хасебе из университета Васеда, Япония.

Положение спутника в настоящей работе дается в L-координатах МакИлвайна, рассчитанных для невозмущенной магнитосферы по модели IGRF. Во время магнитных бурь они не обязательно соответствует дрейфовым орбитам частиц, это лишь аналог исправленной геомагнитной широты (55, 58, 60 and 64 градуса для  $L=3, 3.5, 4$  и  $5$ ). Для идентификации фаз суббури использовались магнитограммы обсерваторий, перечисленных в Таблице 1.

Сравнение измерений частиц с суббуревой активностью не всегда возможно с достаточной точностью, потому что временные интервалы между измерениями на низковысотном спутнике того же порядка, что и продолжительность суббури, к тому же не всегда можно найти магнитную обсерваторию в подходящем долготном секторе. Тем не менее, в большинстве рассмотренных случаев было найдено превосходное совпадение скачков роста потока частиц с суббуревыми активизациями.

### **2.1 Магнитная буря 11.02 2004г.**

Главная фаза магнитной бури силой в  $-120$  нТл началась в 10 UT 11 февраля 2004 года и закончилась в 16 UT, что иллюстрирует верхний блок Рис 1. Буря сопровождалась суббуревой активностью, в нижнем блоке того же рисунка приведена запись Н-компоненты вариации магнитного поля на станции Чокурдах, которая в этот период находилась в полуночно – утреннем секторе. Быстрый рост магнитной бухты является надежным индикатором суббуревой активизации. Установлено, что в эти минуты в авроральной магнитосфере происходит диполизация магнитного поля, генерирующая импульс индукционного электрического поля и в результате ускоряются авроральные электроны с энергией 20-80 кэВ, иногда и до 200-300 кэВ [Лазутин, 1979]. Механизм ускорения – импульсный радиальный заброс частиц к Земле. На магнитограмме зарегистрирована одна сильная активизация в  $\sim 17.40$  UT с амплитудой бухты в 1000 нТл и две активизации послабее.

Обратимся теперь к измерениям электронов, представленных на Рис 2. Здесь и на последующих рисунках этого типа нанесены все измерения спектрометра спутника при пролете данной L координаты. За один оборот спутник четырежды пересекает соответствующую широту, 64 раза в сутки. Мы не делаем различия между пролетами северного и южного полушария, над Бразильской магнитной аномалией (БМА) и на других широтах, только разделяем разными значками пролеты в утреннем и вечернем секторах. Впрочем, в спокойное время, перед бурей, пролеты над БМА выделяются повышенной интенсивностью см., например, рис 2d, но в возмущенное время эта разница сглаживается. Можно утверждать, что рост высыпающихся потоков частиц отражает рост частиц захваченных.

Наиболее ярким событием в этой буре было быстрое возрастание потока электронов в канале 0.3 МэВ в конце главной фазы бури на  $L=3 - 4$  в 17.36 UT, которое замечательным образом совпало с сильной суббуревой активацией, о которой говорилось выше. Это не было просто усиление режима высыпания, иначе скачек потока высыпающихся частиц на порядок не оставался бы на том же уровне в течении нескольких суток.

На рис 3 приведены три широтных L-профиля электронов измеренные в моменты, указанные на рис 1 стрелками. Первая суббуря, вторая по мощности в этом интервале, имевшая место в самом начале магнитной бури (12.40 UT), никак в измерениях частиц не

проявилась, профиль с максимумом на  $L=5$  такой, как должен быть в спокойное время. Профиль в 17.36 UT, совпадающий с самой мощной суббуревой активизацией, отличается радиальным сдвигом по широте его внутренней границы по сравнению с профилем, измеренным за 70 минут до этого, что указывает на эффект радиальной инжекции.

В электронном канале 1.7 МэВ возрастание аналогичное тому, что в канале 0.3 МэВ, не наблюдалось.

## **2.2 Магнитная буря 3-4.04, 2004**

Двуступенчатое возрастание потока электронов 0.3 МэВ было зарегистрировано во время магнитной бури, которая началась 3 апреля 2004г. в 04 UT и достигла минимума  $Dst$  -110 нТл в 24 UT. Рис 4 приводит временной ход  $Dst$  индекса кольцевого тока и  $H$ -компоненты магнитограммы обсерватории Тикси. Из трех суббурь первая наблюдалась до начала магнитной бури, вторая и третья, обе мощностью в 1300 нТл – во время главной фазы бури. На рис 5 приведены измерения электронов на спутнике *SERVIS-1*; видны две ступеньки возрастания электронов в канале 0.3 МэВ на  $L=3.5$  и 4; первое в момент суббуревой активизации в 17.40 UT. Второе возрастание произошло между 2140 и 2256 UT (все три момента указаны стрелками на рис 4), захватило более глубокий уровень  $L=3$  и наблюдалось также в канале 1.7 МэВ (не показано).

## **2.3. Магнитная буря 30.08, 2004**

Это была не очень сильная магнитная буря (-125 нТл), отличающаяся тем, что главная фаза была очень длительной, заняла почти все сутки 30 августа. Буря произошла через месяц после мощной трехступенчатой магнитной бури 22-30 июля 2004г., после которой пояса долго оставались переполнены энергичными электронами и протонами, эффекты сброса которых во время августовской бури были описаны в работе [Лазутин и др., 2011].

$Dst$ -вариация и  $H$ -компонента магнитограммы обсерватории Чакурдах показаны на Рис 6. Суббуревая активность началась в 06 UT 30 августа, и продолжалась до конца главной фазы и еще половину следующего дня. Стрелками отмечено время двух ступеней возрастания интенсивности электронов. На рис 7 приведен временной ход потока электронов 0.3 МэВ на  $L = 3.5, 4, \text{ и } 5$ , а на рис 8 четыре широтных профиля — два во время импульсных инжекций и два- передними. Первое возрастание в наблюдалось в 10.22 UT на  $L=4$  и превысило спокойный уровень вдвое. Второе возрастание темпа счета зафиксировано в 17.38 UT на  $L=3.5$  и 4 во время роста магнитной бухты амплитудой 1200 нТл. За 50 минут до этого на предыдущем витке темп счета в этом канала был на порядок меньше. Для диффузионного механизма это время заведомо слишком коротко и импульсный, инжекционный характер возрастания очевиден.

Оба возрастания прослеживаются также и на  $L=5$  в утреннем секторе, тогда как пролеты на вечерней стороне регистрируют падение интенсивности до уровня полярной шапки.

## **2.4 Магнитная буря 7-11.11, 2004г**

Сильная магнитная буря 7-8 ноября 2004г. мощностью -400 нТл была продолжена еще двумя ступенями усиления кольцевого тока 10-11 ноября и отличалась тем, что на фазе восстановления первой бури были захвачены солнечные протоны, в результате дополнительного ускорения которых образовался новый протонный пояс, существовавший в возбужденном состоянии несколько месяцев [Лазутин и др., 2010].

Развитие кольцевого тока на главной фазе не было плавным, наблюдаются разрывы, которые в работах [Iyemori and Rao, 1986; Kamide et al., 1998] объясняются образованием токового клина суббури на ее активной фазе. Суббуревая активность в течение этой магнитной бури была действительно высока, как видно из рис. 9.

На рис 10-11 приведены измерения электронов с энергией 0.3 и 1.7 МэВ на  $L=3, 4$  и 5.

Первое что бросается в глаза, это совпадение темпа счета электронов на  $L=4$  и  $5$  с темпом счета в полярной шапке ( $L=10$ ), что свидетельствует о том, что соответствующие магнитные силовые линии вытянуты в хвост магнитосферы всю главную фазу и часть фазы восстановления.

На  $L < 3$  до середины активной фазы изменений не наблюдается, видны лишь обычные возрастания темпа счета при пролетах над БМА.

В 21-24 UT потоки электронов на  $L=2.5$  и  $3$  также сравнялись с потоком в полярной шапке вследствие продолжающегося роста кольцевого тока. Эту вытянутость силовых линий в хвост могла прервать диполизация при суббуревой активизации и первая сильная суббуря произошла в 01 UT 8 ноября, что видно из графика  $A_e$  индекса на рис 9. Что в это время происходит с потоком частиц? На  $L=3$  и  $4$  в утреннем секторе наблюдается скачек интенсивности электронов больше чем на порядок в каналах  $0.3$  и  $1.7$  МэВ. Как видно из измерений  $L$ -профилей на утренней стороне, представленных на рис 12, за час до возрастания, в 23.57 UT, регистрируется ослабление и поджатие радиационного пояса, тогда как суббуря вызывает резкий рост потока частиц и сдвигает границы радиационного пояса, внутренние на низкие, внешние — на более высокие широты.

Рассмотрим теперь магнитограммы двух станций скандинавской цепочки (рис 13).

Суббуря начинается на субавроральной широте (обсерватория Пело) в 01 UT и развивается по направлению к полюсу, достигая к 0130 UT Шпицбергена (обсерватория Хорнсунд).

Полярная экспансия на активной фазе суббури — явление типичное, и с экспансией движется на высокие широты и область диполизации, что и проявляется к сдвигу на высокие  $L$  внешней границы области регистрации энергичных электронов. Процесс этот не затрагивает дневные и вечерние часы местного времени, но только полуночно-утренний сектор.

Отметим, что на  $L=2.5$  возрастания в интервале 1-2 UT нет, но позже, еще до конца главной фазы и здесь начинается рост потока частиц, вероятно связанный со следующей магнитосферной суббурей.

## **2.5. Магнитная буря 22.01, 2004г.**

На рис 14 приведены графики  $Dst$  и суббуревой активности во время сильной ( $-150$  нТл) магнитной бури 21 января 2004г. Две суббури, умеренная в середине и сильная в конце главной фазы наблюдались вблизи местной полуночи - в раннем утреннем секторе.

Вариации интенсивности электронов с энергией  $0.3$  МэВ показаны на рис. 15. В 10.21 UT на  $L=3.5$  был зарегистрирован нормальный темп счета ( $4 \cdot 10^4$  (см<sup>2</sup>. с. стер)<sup>-1</sup>), через полчаса в 10.55 UT - ( $2 \cdot 10^5$  (см<sup>2</sup>. с. стер)<sup>-1</sup>) и в 12.07 UT - ( $5 \cdot 10^5$  (см<sup>2</sup>. с. стр)<sup>-1</sup>). Все три момента обозначены на магнитограмме рис 14, и два последних замечательным образом совпадают с активизацией суббури.

## **2.6. Магнитная буря 7-8.01, 2005г.**

Умеренная магнитная буря началась в 12 UT 7 января 2005 г. и достигла первого минимума  $Dst$   $-50$  нТл в 16 UT. В 22 UT возобновился рост кольцевого тока и в 02 UT 8 января  $Dst$  достиг минимума  $-100$  нТл (нижний блок рис 16). Во время первой ступени магнитной бури суббуревая активность отсутствовала и в потоках частиц в данных спутника SERVIS-1 изменений нет. По данным магнитометров цепочки IMAGE, суббури начались в 22.30 UT и в 22.45UT достигли  $-1000$  нТл в  $H$ -компоненте на нескольких скандинавских станциях (рис 17).

Между пролетом до суббури в 21.52 UT и следующим пролетом в том же утреннем секторе прошло 80 минут и пик суббури был пропущен, однако в пролетах в 23.10 и 23.38 UT десятикратное возрастание пока электронов в каналах  $0.3$  и  $1.7$  МэВ было

зарегистрировано. Вполне возможно, что и это возрастание было связано с суббуравой активизацией.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Воздействие магнитосферных суббурь на динамику энергичных электронов во время магнитных бурь обычно рассматривается через взаимодействие частиц с пульсациями и ОНЧ-излучениями. Суббуре при этом отводится роль генератора излучений, которые в свою очередь могут сбрасывать или ускорять электроны радиационных поясов посредством достаточно медленной питч-угловой или радиальной диффузии.

Значительные возрастания потока электронов за короткое время (от 30 минут до 1.5 часов) говорит о том, что этот эффект не может быть объяснен процессом радиальной диффузии. Поскольку возрастания регистрировались во время главной фазы, в отсутствии импульсов SC, необходимо привлечь другой источник инжекции. Предположение о прямом воздействии суббурь, высказанное в работе [Nagai et al., 2006] требовало серьезного подтверждения, поэтому мы привели достаточно много примеров, чтобы с уверенностью связать измеренные на спутнике SERVIS-1 быстрые возрастания потока электронов с процессами активизации магнитосферной суббури.

Опроцессах активизации известно давно, первые свидетельства ускорения электронов во время ведущего склона магнитной бухты были получены по измерениям всплесков рентгеновского излучения в стратосфере высоких широт. Энергии родительских электронов оценивались в 20-100 кэВ, иногда до 300 кэВ. Когда стали доступны прямые измерения потоков частиц и магнитного поля в плоскости экватора, стало ясно, что ускорение частиц, электронов и протонов, вызывается инжекцией частиц к Земле в скрещенном магнитном и индукционном электрическом поле, генерированном во время диполизации магнитного поля. Силовые линии магнитного поля, вытянутые от Земли в ночном секторе магнитосферы, быстро, за несколько минут, возвращаются к квазидипольной конфигурации — собственно цепочка таких диполизаций и является непременной частью активной фазы суббури и ее начальной стадии полярной экспансии.

Кольцевой ток ослабляет напряженность магнитного поля, вытягивает силовые линии в хвост магнитосферы. В вечернем секторе этот процесс доминирует, в полуночно-утреннем секторе на активной фазе суббури вытягиванию противодействуют процессы диполизации. Они кратковременны, несколько минут, но их много, в каждой суббуре цепочка активизаций и суббури следуют одна за другой, в результате во время не слишком сильных магнитных бурь силовые линии на утренней стороне с  $L=5$  уходят в хвост довольно редко. Во время сильной магнитной бури 7-8 ноября 2004г. влияние кольцевого тока перевешивает и спутник чаще регистрирует поток электронов равный потоку в полярной шапке.

Отметим основные особенности процессов быстрой инжекции электронов во время мировых бурь.

1. Суббури начинаются на южной границе авроральной магнитосферы и здесь активизации наиболее мощные; во время магнитных бурь эта граница смещается вниз по широте, что создает благоприятные условия для ускорения электронов радиационного пояса при суббуравой инжекции на внутренних дрейфовых оболочках, вплоть до  $L=2.5$ . Одна суббуравая активность без развитого кольцевого тока равно как и развитый кольцевой ток без значительной суббуравой активности импульсного возрастания на  $L=4$  или меньше не вызывают. На внешних оболочках, например, на геостационарной орбите, никакого существенного отличия от активизаций в отсутствие бурь не ожидается, разве что амплитуда возрастания магнитного поля во время диполизации повышена [Vaumjohann et al., 1996]. По этой причине рассмотренного нами

эффекта в данных геостационаров не было видно.

2. В канале 1.7 МэВ быстрая инжекция наблюдалась редко, только во время особенно сильных магнитных бурь. Возрастания потока энергичных электронов во время суббури по измерениям на спутнике КОРОНАС-И наблюдались исключительно в канале 0.3 МэВ [Kuznetsov et al., 2004]. Это ограничение по энергии соответствует или несколько превышает верхние значения энергии электронов, ускоряемых во время обычных магнитосферных суббурь [Лазутин, 1979]. Таким образом возможно, что радиационный пояс пополняется одной инжекцией авроральных электронов. Однако возможность ускорения и «старых» электронов радиационного пояса нельзя исключить.

3. Быстрая инжекция повышает интенсивность электронов на 1-2 порядка во всех рассмотренных случаях, и этот механизм можно считать одним из главных механизмов пополнения внутренней магнитосферы во время магнитных бурь. Не следует, однако, недооценивать роль и умеренной радиальной диффузии, особенно для электронов с энергией в единицы МэВ и выше. В измерениях на спутнике SERVIS-1 радиальная диффузия с характерным временем в десять часов и более наблюдалась часто, но мы ее здесь не рассматривали, так как она достаточно хорошо изучена экспериментально и теоретически [см. обзор Spritz et al., 2008].

#### **4. ВЫВОДЫ**

Впервые исследована связь быстрых возрастаний интенсивности электронов с энергией  $>0.3$  МэВ с магнитосферными суббурями. Анализ возрастаний во время шести магнитных бурь показал, что они вызываются радиальной инжекцией электронов импульсным электрическим полем, индуцированным во время суббуревых активизаций. Показано, что импульсная инжекция является одним из основных механизмов пополнения электронных радиационных поясов во внутренней магнитосфере и в сочетании с умеренной радиальной диффузией отвечает за появление в магнитосфере после магнитных бурь больших потоков энергичных электронов («киллеров»).

#### **Благодарности**

Автор благодарен профессору Н. Хасебе из университета Васеда, Япония, за передачу базы данных спутника SERVIS-1 и Е. Муравьевой за помощь. Большая благодарность за возможность использовать данные магнитометров Института космофизических исследований и аэронавтики СО РАН в Якутске, сети IMAGE и MCD Киото.

#### **Список литературы**

- Кузнецов С.Н., Тверская Л.В. Радиационные пояса // в кн. Модель космоса. Т.1. Под ред. М.И. Панасюка. М.: Университет. С. 519-546. 2007.

- Лазутин Л.Л. Рентгеновское излучение авроральных электронов и динамика магнитосферы // Л. Наука. 1979.

-Лазутин Л.Л. Авроральная магнитосфера // в кн. Модель космоса Т.1. под ред. М.И. Панасюка. М.: Университет. С. 547-578. 2007.

- Лазутин Л.Л., Кузнецов С.Н. Природа внезапных авроральных активизаций в начале магнитных бурь // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 48. № 2. С. 173-182. 2008.

- Лазутин Л.Л., Гоцелюк Ю.В., Муравьева Е.А., Мяжкова И.Н., Панасюк М.И., Старостин Л.И., Юшков Б.Ю., Кудела К., Хасебе Н., Сукураи К., Хареяма М. Динамика солнечных протонов в магнитосфере Земли во время магнитных бурь в ноябре 2004 - январе 2005. // Геомагнетизм и

аэрономия. Т. 50. № 2. С. 176–188. 2010.

- Лазутин Л.Л., Панасюк М.И., Хасебе Н. Ускорение и потери энергичных протонов и электронов во время магнитной бури 30–31 августа 2004 г. // Космич. Исслед. Т. 49. № 1. С. 38–44. 2011.

- Павлов Н.Н., Тверская Л.В., Тверской Б.А., Чучков Е.А. Изменения потока частиц радиационных поясов во время сильной магнитной бури 24 марта 1991 // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 33. № 6. С. 41–45. 1993.

- Редерер Х. Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем // М.: Мир. 1972.

- Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли // Наука. 1968.

- Antonova, E. E., I. P. Kirpichev, M.V. Stepanova, K. G. Orlova, I. L. Ovchinnikov Topology of the high latitude magnetosphere during large magnetic storms and the main mechanisms of relativistic electron acceleration // Adv. Space Res. V. 43. P. 628–633. 2009.

- Baker D. N., Kanekal S. G., Li X., Monk S. P., Goldstein J., and Burch J. L. An extreme distortion of the Van Allen belt arising from the “Halloween” solar storm in 2003 // Nature. V. 432. P. 878–881. 2004.

- Baumjohann W., Kamide Y., and Nakamura R. Substorms, storms, and the near-Earth tail // J. Geomagn. Geoelectr. V. 48. P. 177. 1996.

- Elkington S. R., Hudson M. K., Chan A. A. Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal-mode Pc-5 ULF oscillation // Geophys. Res. Lett. V. 26. P. 3273. 1999.

- Elkington S. R., Hudson M. K., Chan A. A. Resonant acceleration and diffusion of outer zone electrons in an asymmetric geomagnetic field // J. Geophys. Res. V. 108 (A3). P. 1116. 2003.

- Friedel R. H. W., Reeves G. D., and Obara T. Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere -A review // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. V. 64 (2). P. 265–282. 2002.

- Horne R. B., and Thorne R. M. Relativistic electron acceleration and precipitation during resonant interactions with whistler-mode chorus // Geophys. Res. Lett. V. 30(10). P. 1527. doi:10.1029/2003GL016973. 2003.

- Horne R. B., Thorne R. M., Glauert S. A., Meredith N. P., Pokhotelov D., Santolik O. Electron acceleration in the Van Allen belts by fast magnetosonic waves // Geophys. Res. Lett. V. 34. P. 17107. 2007.

- Iyemori T. and Rao D. R. K. Decay of the DST field of geomagnetic disturbance after substorm onset and its implications for storm-substorm relation // Ann. Geophys. V. 19. P. 608. 1996.

- Kamide Y., Baumjohann W., Daglis A., et al. Current understanding of magnetic storms: storm-substorm relationship // J. Geophys. Res. V. 103. A8. P. 17705–17728. 1998.

- Kuznetsov S. N., Lazutin L. L., Weatherwax A. T., Rosenberg T. J. Precipitation of 0.5 MeV electrons and substorm expansion into the polar cap // Proceedings of the 7th international Conference on substorms. ed. by N. Ganushkina and T. Pulkkinen. FMI. Helsinki. P. 172–176. 2004.

- Lanzerotti L.J., MacLennan C.G., Schulz M. Radial diffusion of outer-zone electrons: an empirical approach to third-invariant violation // J. Geophys. Res. V. 75. P. 5351–5371. 1970.

- Li X., Roth I., Temerin M., Wygant J. R., Hudson M. K., and Blake J. B. Simulations of the prompt energization and transport of radiation belt particles during the March 24, 1991 SSC // Geophys. Res. Lett. V. 20. P. 2423. 1993.

- Loto'aniu T.M., Mann I.R., Ozeke L.G., Chan A. A., Dent Z.C., Milling D. K. Radial diffusion of relativistic electrons into the radiation belt slot region during the 2003 Halloween geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 111. A04218. doi:10.1029/2005JA011355. 2006.

- Lyons L. R., and Thorne R. M. Equilibrium structure of radiation belt electrons // J. Geophys. Res. V. 78. P. 2142. 1973.



- Lyons L. R., Lee D.-Y., Thorne R. M., Horne R. B., and Smith A. J. Solar wind-magnetosphere coupling leading to relativistic electron energization during high-speed streams // *J. Geophys. Res.* V. 110. A11202. doi:10.1029/2005JA011254. 2005.
- Meredith N. P., Horne R. B., Iles R. H. A., Thorne R. M., Heynderickx D., and Anderson R. R. Outer zone relativistic electron acceleration associated with substorm-enhanced whistler mode chorus // *J. Geophys. Res.* V. 107(A7). P. 1144. doi:10.1029/2001JA900146. 2002.
- Nagai T., Yukimatu A. S., Matsuoka A., Asai K. T., Green J. C., Onsager T. G., and Singer H. J. Timescales of relativistic electron enhancements in the slot region // *J. Geophys. Res.* V. 111. A11205. doi:10.1029/2006JA011837. 2006.
- Nose M., Koshiishi H., Matsumoto H., Brandt P. C.:son, Keika K., Koga K., Gora T. and Obara T. Magnetic field dipolarization in the deep inner magnetosphere and its role in the development O+ reach ring current // *J. Geophys. Res.* V. 115. A00J03. doi:10.1029/2010JA0153021. 2010.
- Obara T., Nagatsuma T., Den M., Miyoshi Y., and Morioka A. Main phase creation of “seed” electrons in the outer radiation belt, Earth // *Planets Space* V. 52. P. 41–47. 2000.
- O’Brien T. P., Lorentzen K. R., Mann I. R., Meredith N. P., Blake J. B., Fennell J. F., Looper M. D., Milling D. K., and Anderson R. R. Energization of relativistic electrons in the presence of ULF power and MeV microbursts: Evidence for dual ULF and VLF acceleration // *J. Geophys. Res.* V. 108(A8). P. 1329. doi:10.1029/2002JA009784. 2003.
- Shprits Y.Y., Elkington S., Meredith N. P., Subbotin D. A. Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt I:—radial transport // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 70. P. 1679–1693. 2008.
- Shprits Y.Y., Subbotin D. A., Meredith N. P., Elkington S. Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt II: Local acceleration and losses // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 70. P. 1694–1713. 2008a.
- Summers D., Thorne R. M., and Xiao F. Relativistic theory of wave-particle resonant diffusion with application to electron acceleration in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 103. P. 20,487 – 20,500. 1998.
- Summers D., Ma C., Meredith N. P., Horne R. B., Thorne R. M., Heynderickx D., and Anderson R. R. Model of the energization of outer-zone electrons by whistler-mode chorus during the October 9, 1990 geomagnetic storm // *Geophys. Res. Lett.* V. 29(24). P. 2174. doi:10.1029/2002GL016039. 2002.
- Thorne R. M., Shprits Y. Y., Meredith N. P., Horne R. B., Li W. L. and Lyons R. Refilling of the slot region between the inner and outer electron radiation belts during geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 112. A06203. 2007.
- Vassiliadis D., Fung S. F., and Klimas A. J. Solar, interplanetary, and magnetospheric parameters for the radiation belt energetic electron flux // J. Geophys. Res.* V. 110. A04201. doi:10.1029/2004JA010443. 2005.

## Рисунки

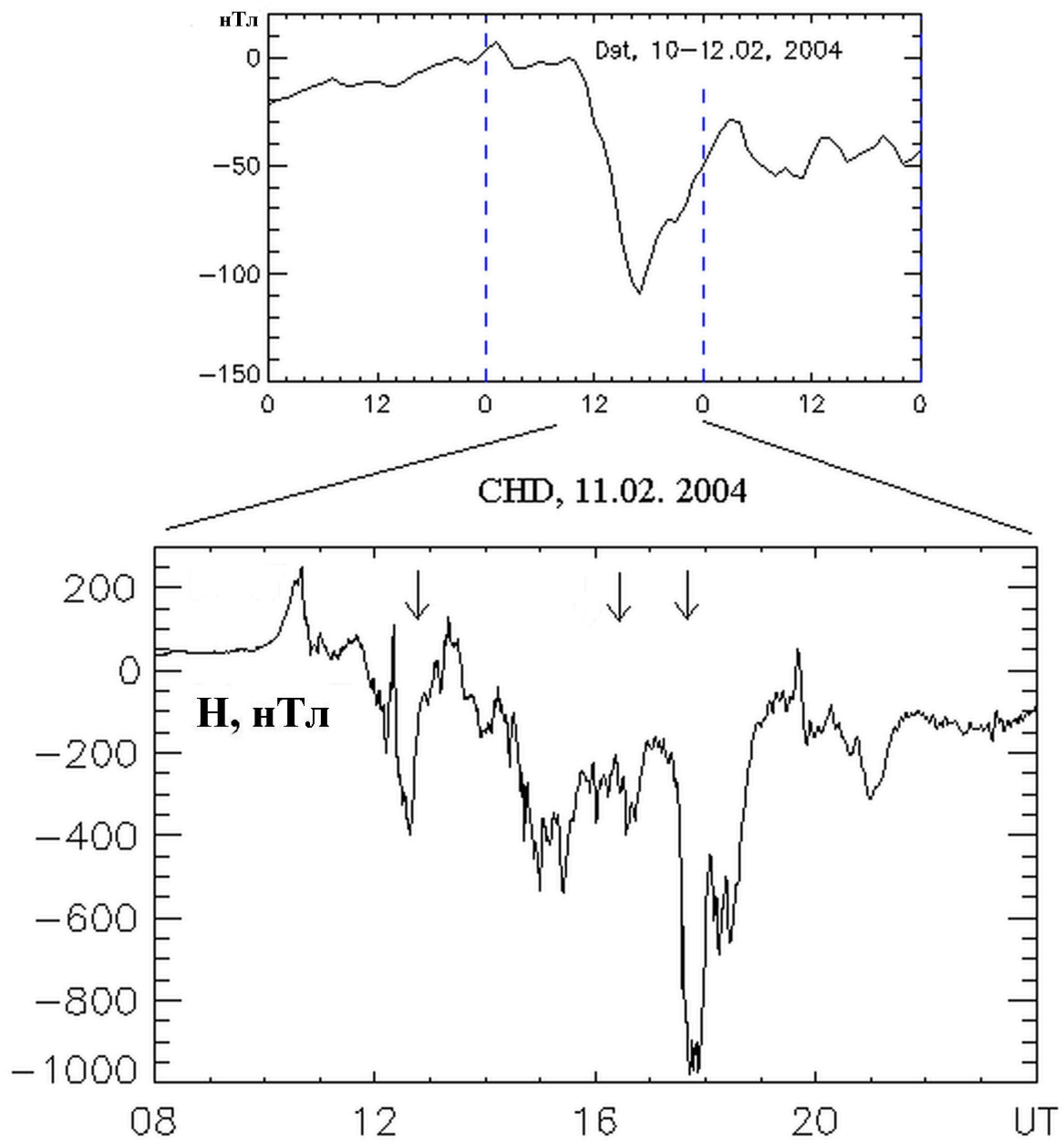


Рис 1. Магнитная буря 11 февраля 2004 года, Dst-вариация и H-компонента магнитограммы обсерватории Чакурдах. Стрелками отмечены упомянутые в тексте моменты измерений релятивистских электронов на спутнике SERVIS-1.

SERVIS-1, 10 -12.02.2004

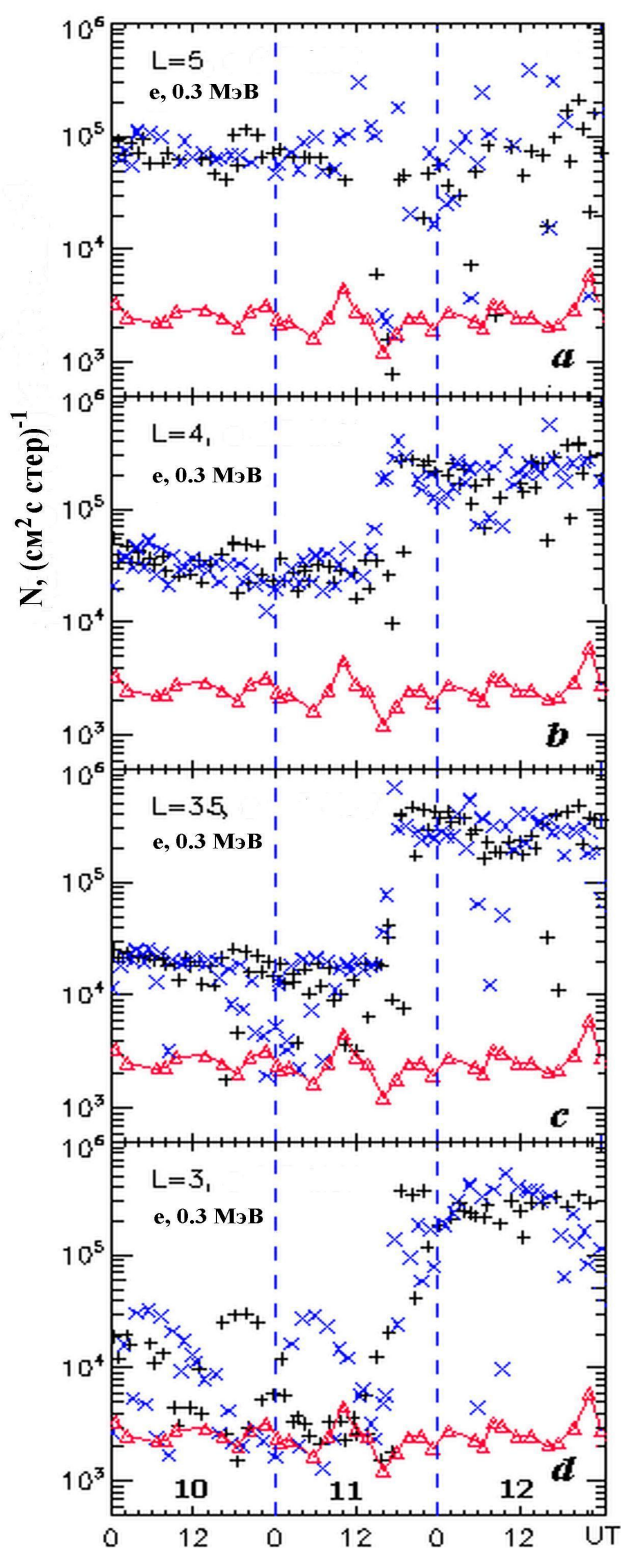


Рис 2. Вариации потока электронов в канале 0.3 МэВ 10-12.02. 2004. Прямые крестики — пролеты в вечернем секторе, косыми — в утреннем. Треугольники и сплошная линия — измерения в полярной шапке ( $L=10$ ).

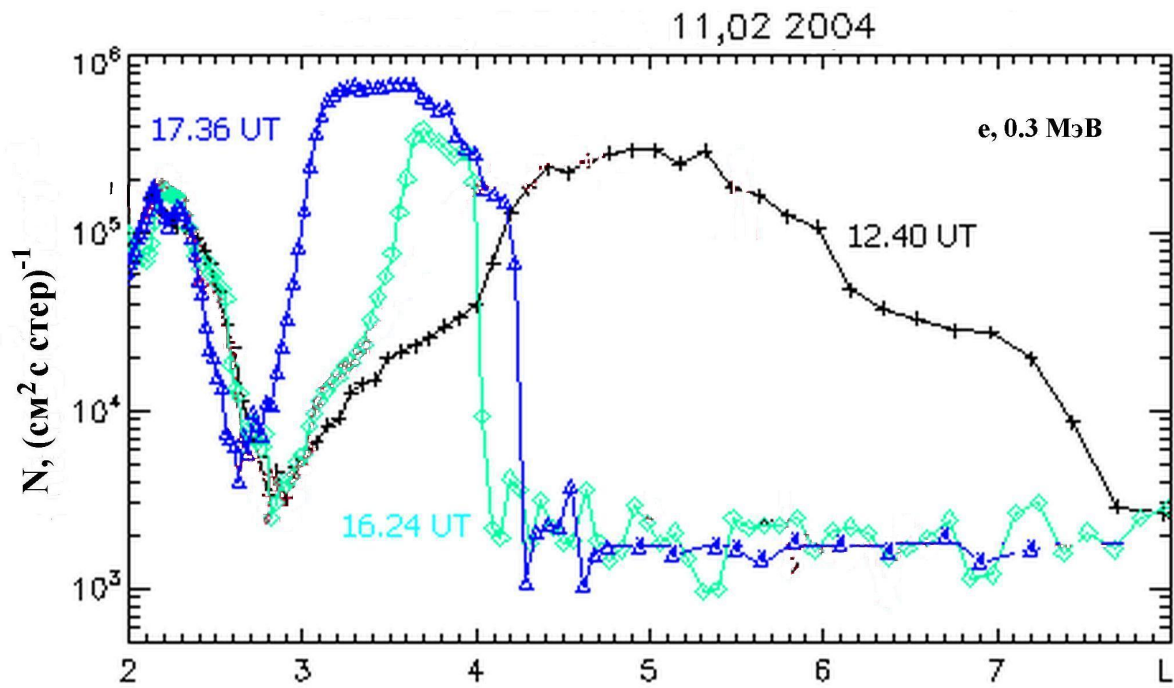


Рис 3. Три широтных (по L) профиля электронов 0.3 МэВ 11.02. 2004. Указано время пролета L=4.

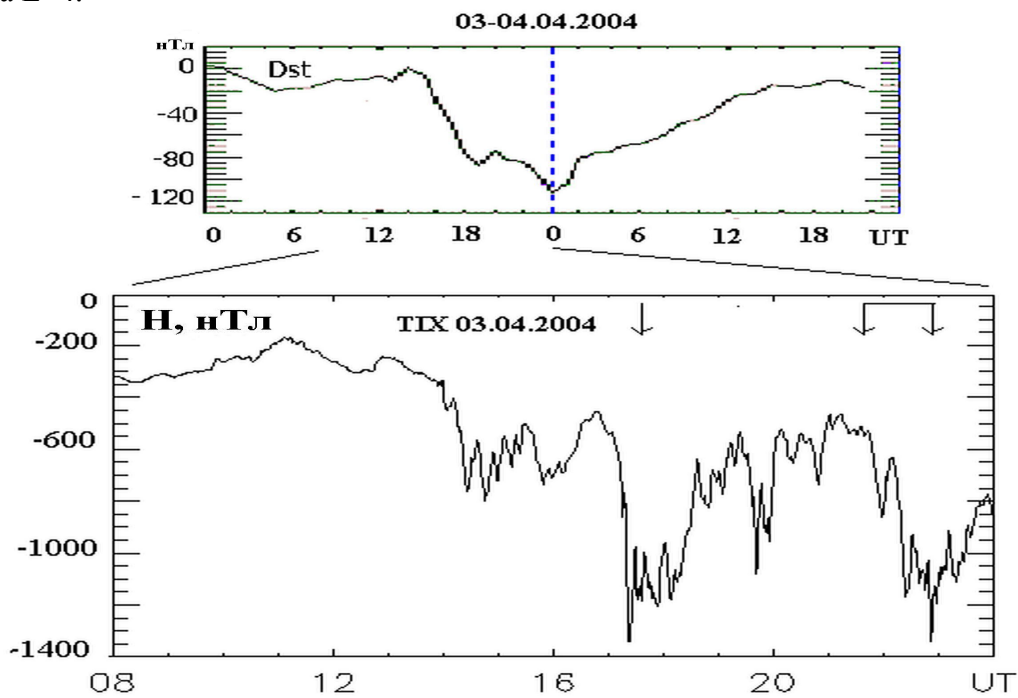


Рис 4. Магнитная буря 3-4 апреля 2004 года, Dst-вариация и H-компонента магнитограммы обсерватории Тикси.

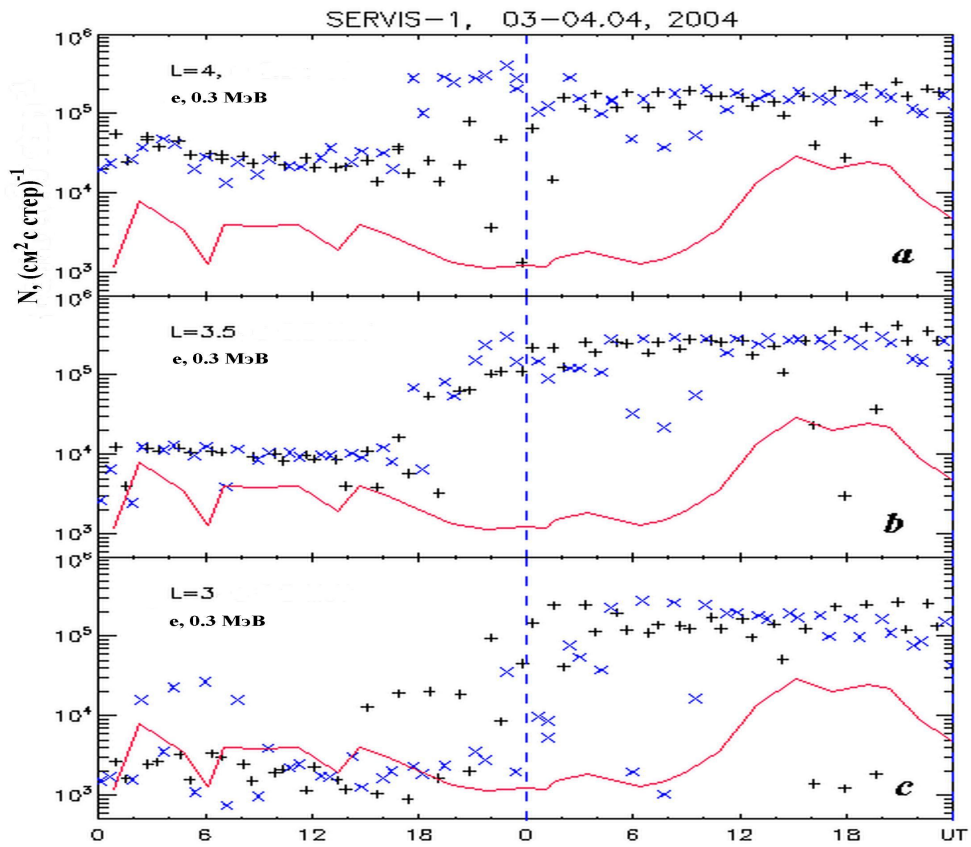


Рис 5. То же, что на рис 2 во время магнитной бури 3-4.04. 2004.

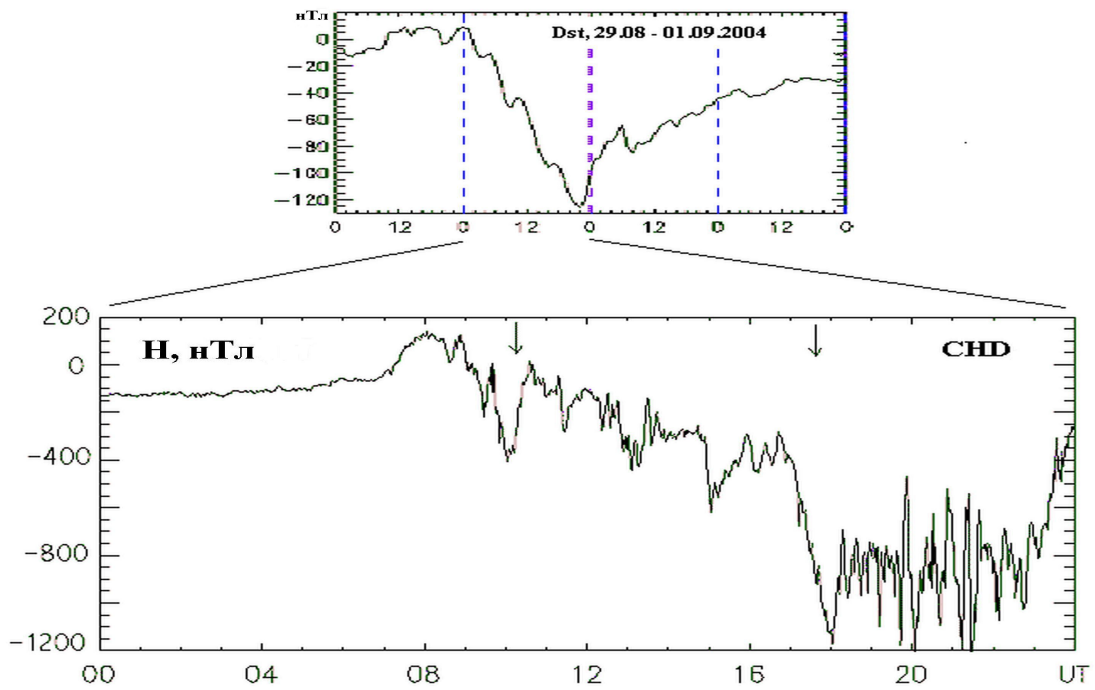


Рис 6. Магнитная буря 30 августа 2004 года, Dst-вариация и H-компонента магнитограммы обсерватории Чакурдах.

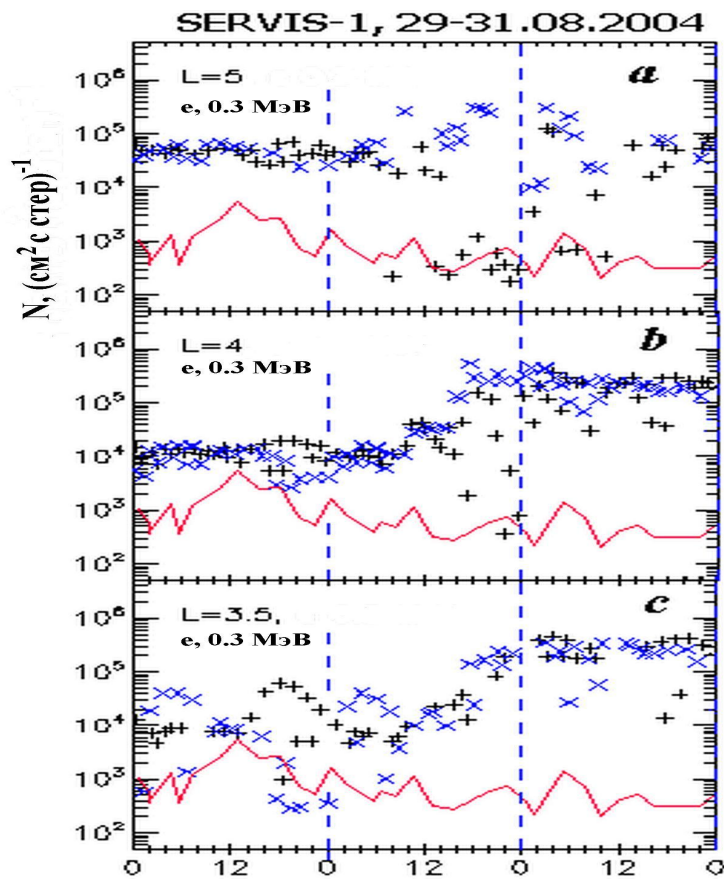


Рис 7. То же, что на рис 2 во время магнитной бури 30.08. 2004.

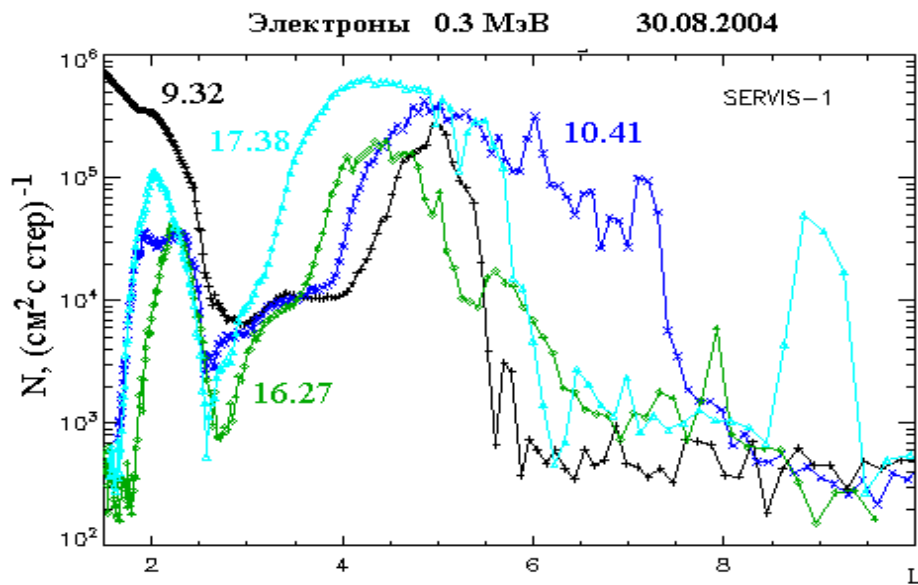


Рис 8. Два профиля до и два после суббуравой инъекции электронов 30.08.2004.

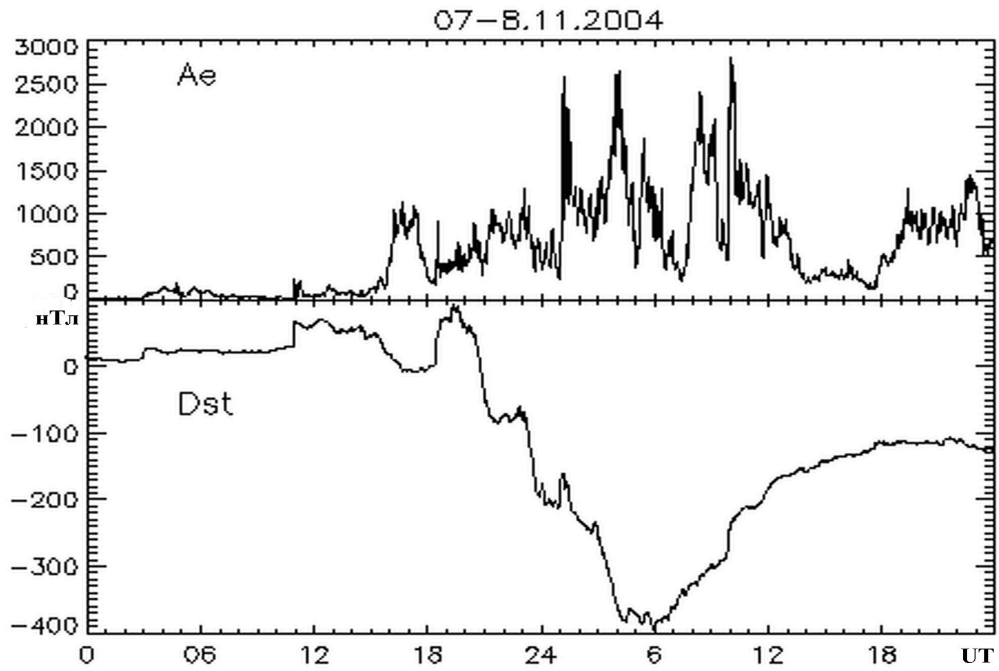


Рис 9. Магнитная буря 7-8 ноября 2004. Ae и Dst индексы авроральной активности и кольцевого тока.

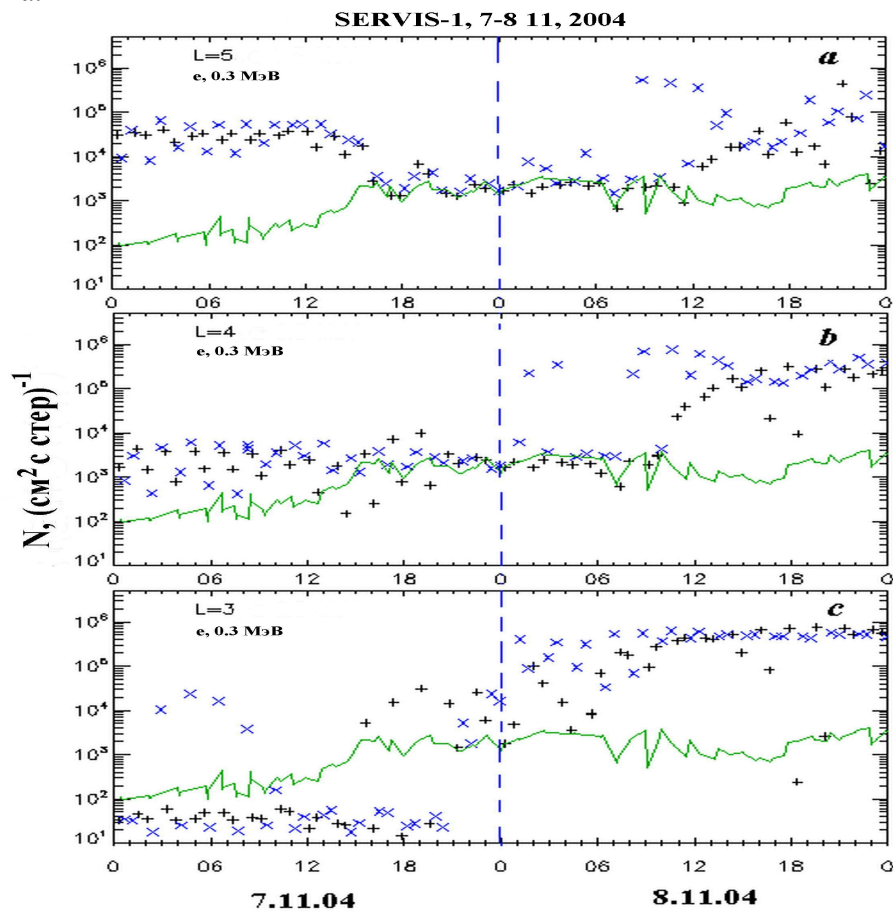


Рис 10. То же, что на рис 2 во время магнитной бури 7-8.11 .2004.

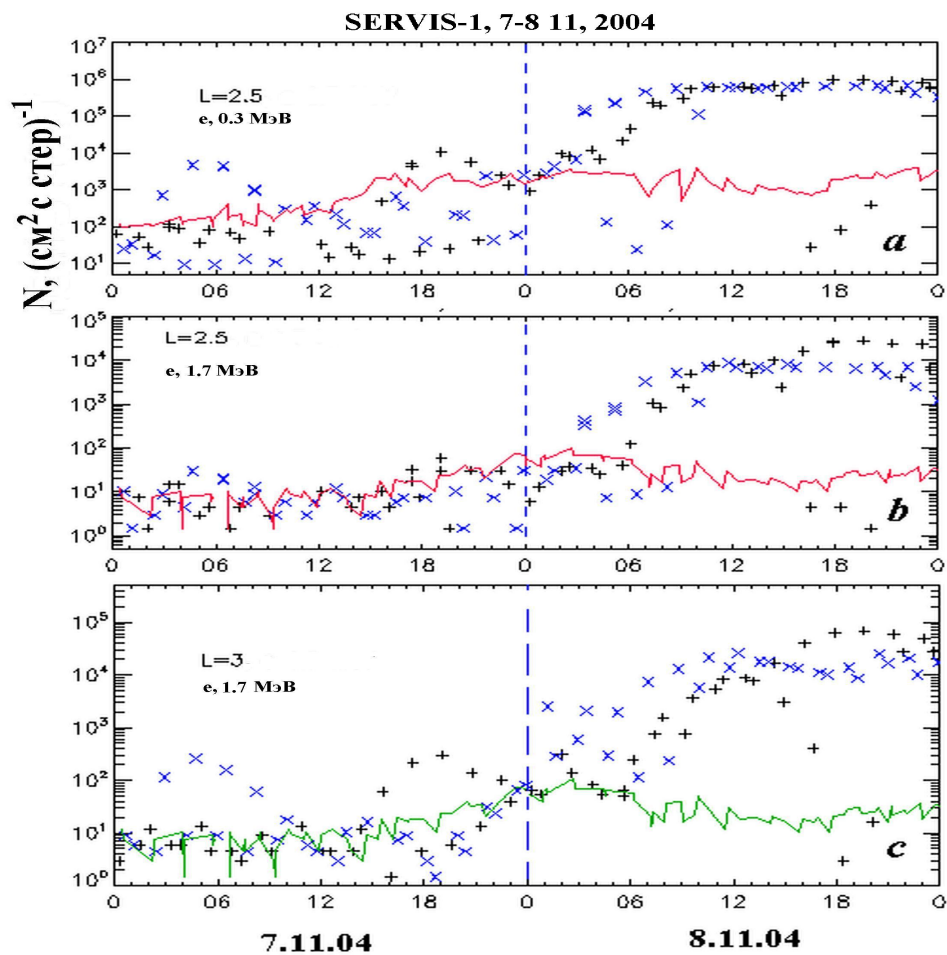


Рис 11. То же. Что на рис 10 на L=2.5 и 3 для каналов 0.3 и 1.7 МэВ.

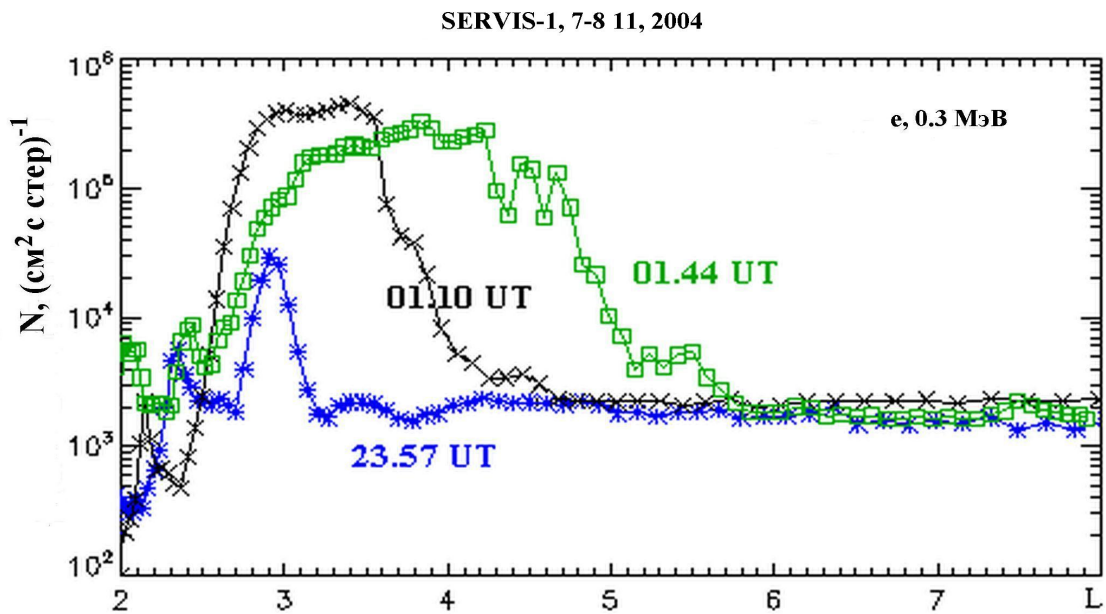


Рис 12. Три широтных профиля электронов 0.3 МэВ во время главной фазы в отсутствии суббури (23.57 UT) и во время мощной суббури.



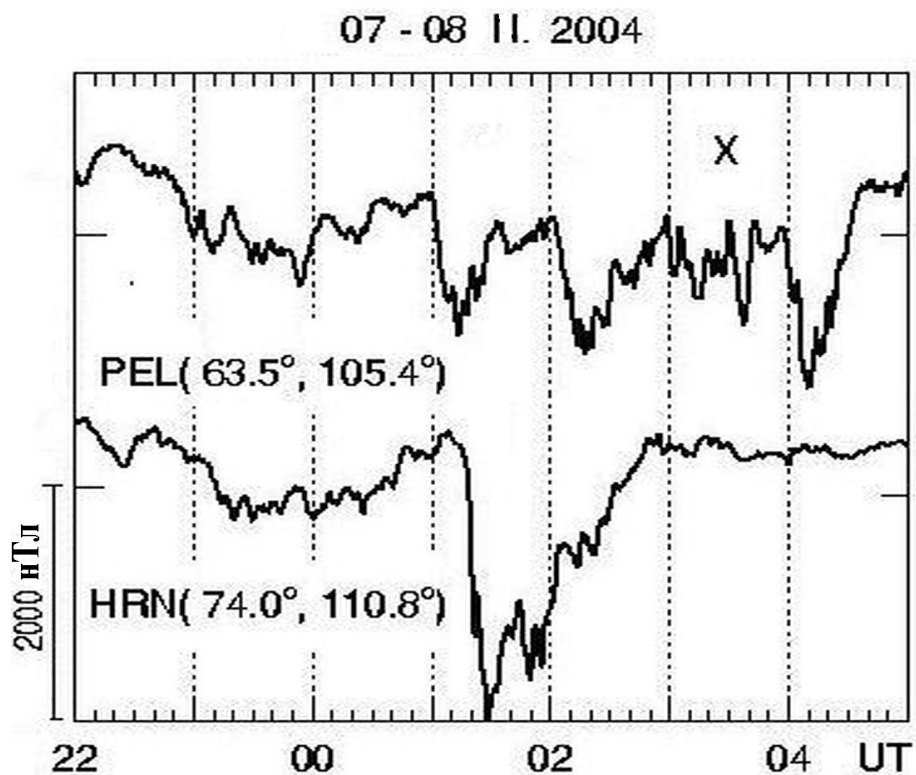


Рис 13. Магнитограммы субавроральной и высокоширотной обсерваторий во время быстрых возрастаний потока электронов.

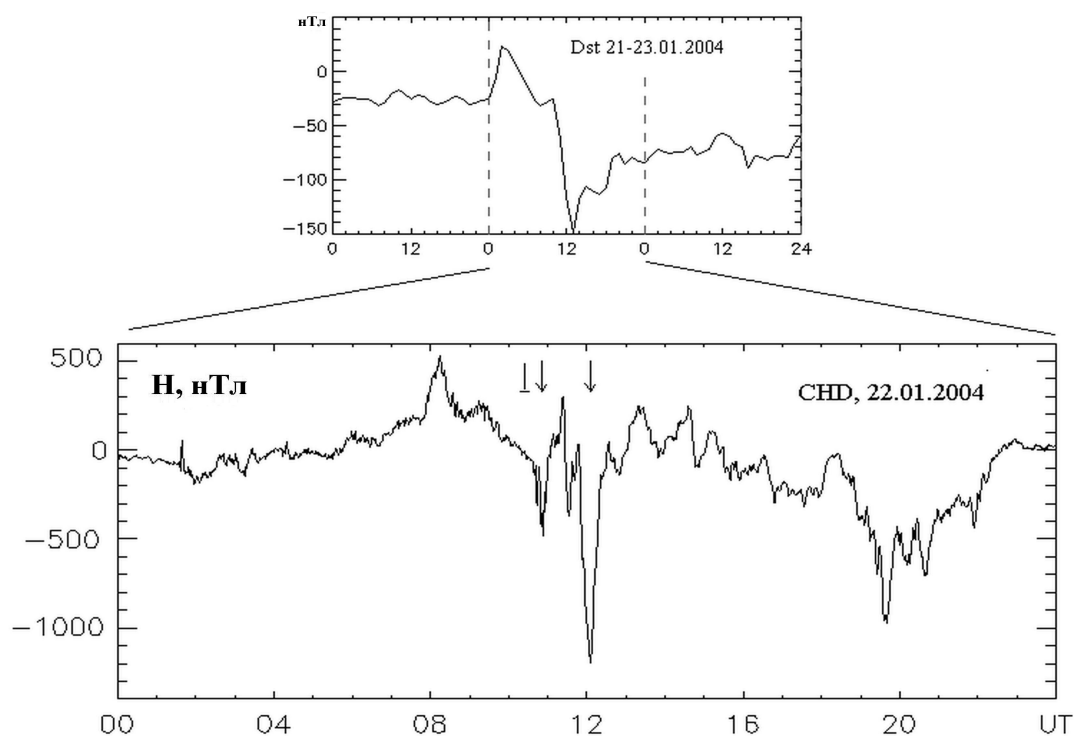


Рис 14. Магнитная буря 22 января 2004 года, Dst-вариация и H-компонента магнитограммы обсерватории Чакурдах.

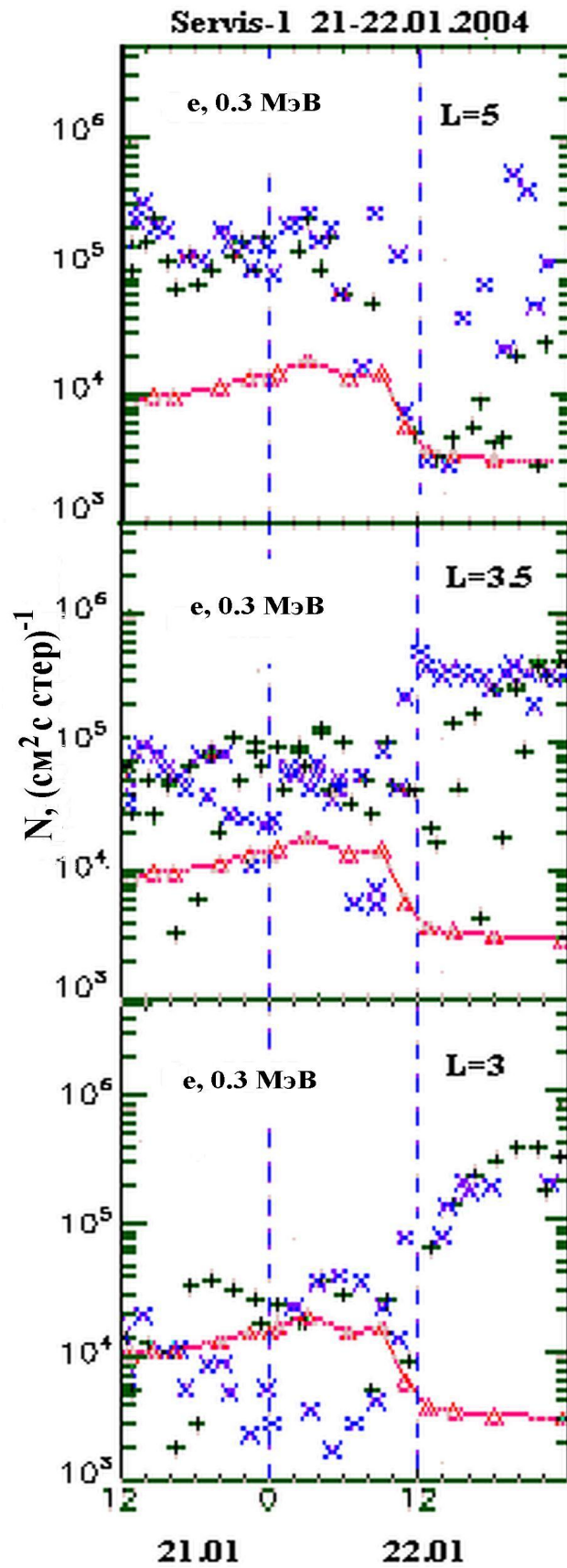


Рис 15. То же, что на рис 2 во время магнитной бури 21-22.01 .2004.

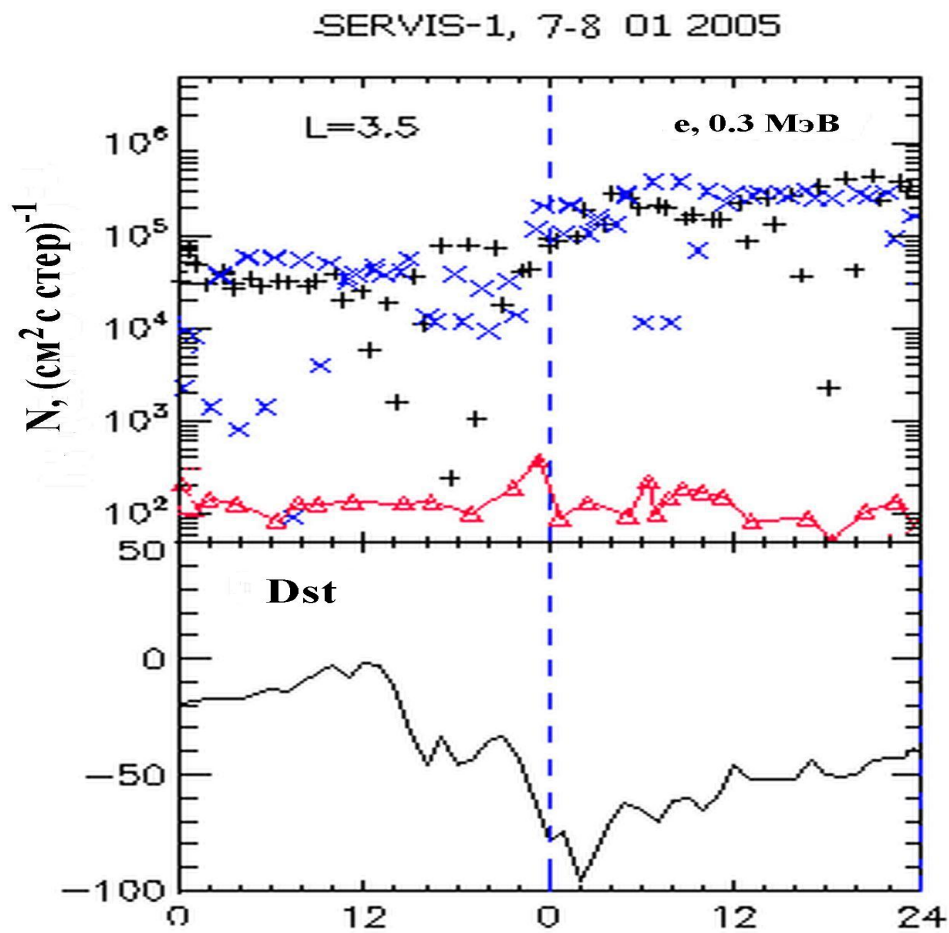


Рис 16. Вариации потока электронов в канале 0.3 МэВ на  $L=3.5$  и Dst-вариация во время магнитной бури 7-8 января 2005 г.

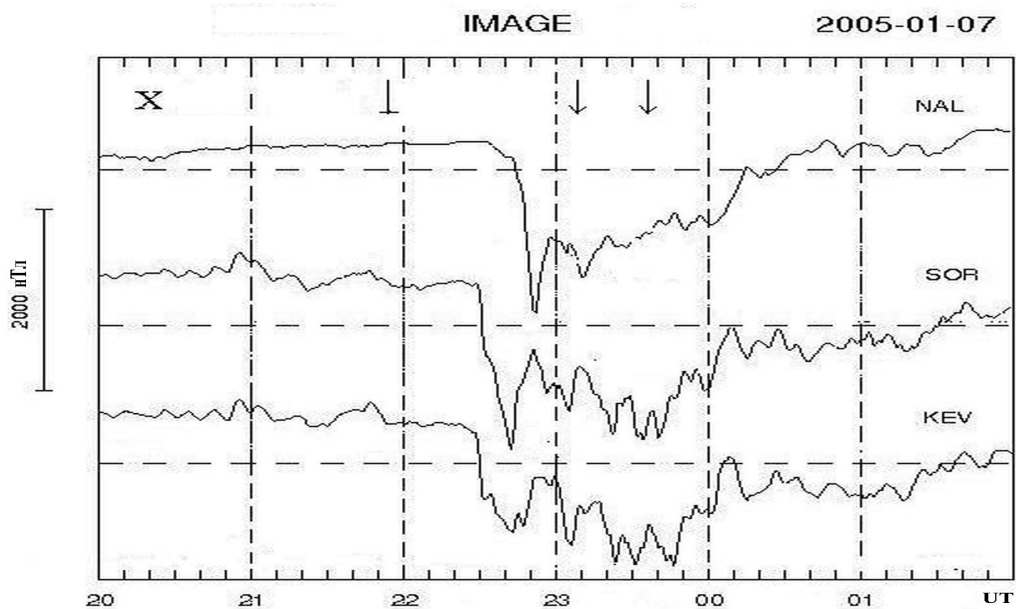


Рис 17. X-компоненты магнитограмм трех станций скандинавской цепочки IMAGE 07.01. 2005г.

Таблица Координаты магнитных обсерваторий

Код	Имя	GG шир. град.	GM шир. град.	GG долг. град.	GM долг. град.
NAL	Ny Elesund	78.9	75.2	11.9	112.1
HRN	Hornsund	77.0	74.0	15.6	110.8
SOR	Soroya	70.5	67.3	22.2	106.2
KEV	Kevo	69.8	66.3	27.0	109.2
TIX	Tixie	71.6	65.6	128.8	196.9
CHD	Chokurdakh	70.6	64.7	147.9	212.1
PEL	Pello	66.9	63.6	24.1	104.9