

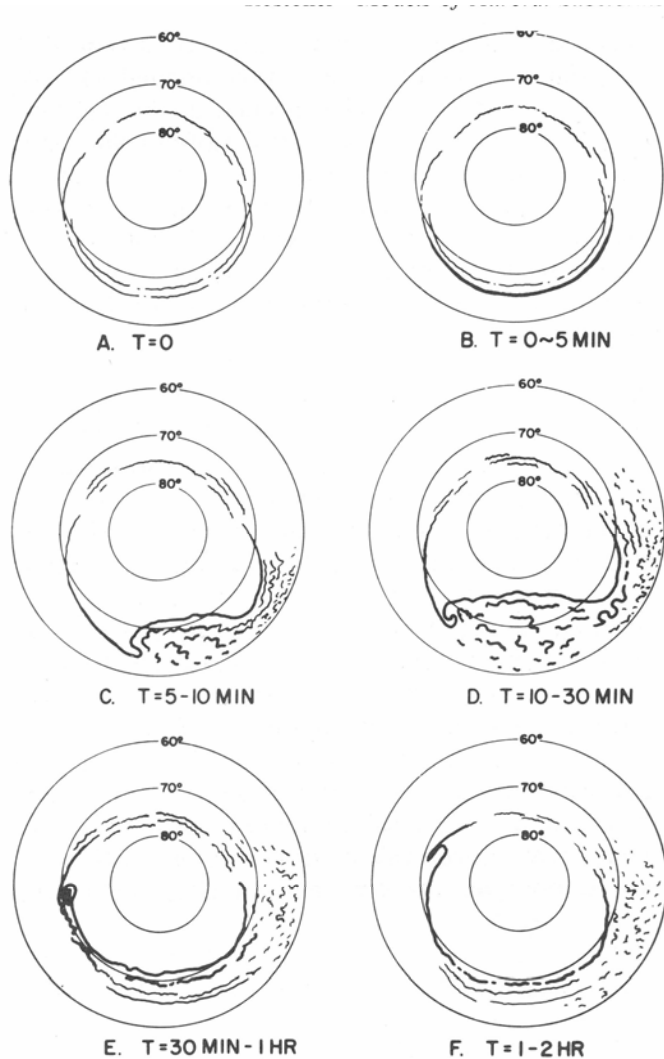
**Магнитосферные суббури,
генерируемые при непрерывном
воздействии геоэффективного
солнечного ветра: несоответствие
между ходом магнитной активности и
полярными сияниями**

О. Трошичев

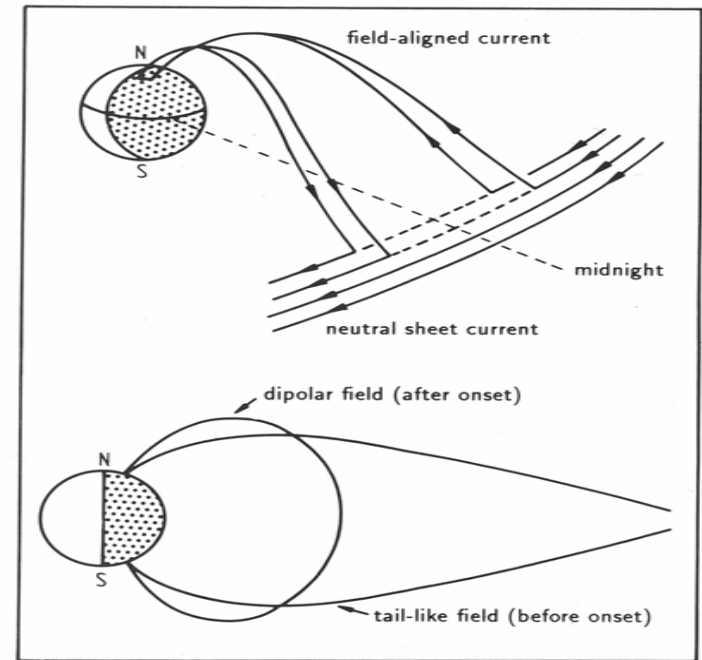
Арктический и Антарктический НИИ, С.Петербург

Классическая концепция развития авроральной суббури

Суббури в полярных сияниях (Akasofu, 1964)



Образование токового клина вследствие замыкания токов нейтрального слоя хвоста магнитосферы через ионосферу авроральной зоны и перестройка магнитного поля (диполяризация) в ночной магнитосфере.



Начало магнитосферной суббури однозначно определяется вторжением авроральных электронов в авроральную зону (уярчение экваториальной дуги сияний в овале), диполяризацией магнитного поля и инжекцией энергичных электронов и протонов на геосинхронную орбиту.

Периодически повторяющиеся пилообразные (sawtooth) суббури

Пилообразными (sawtooth) суббурями называют сильные магнитные возмущения, интенсивность которых периодически резко возрастает и убывает.

Sawtooth возмущения были выявлены по наблюдениям квазипериодических инъекций потоков энергичных частиц на геостационарной орбите (Belian *et al.*, 1995).

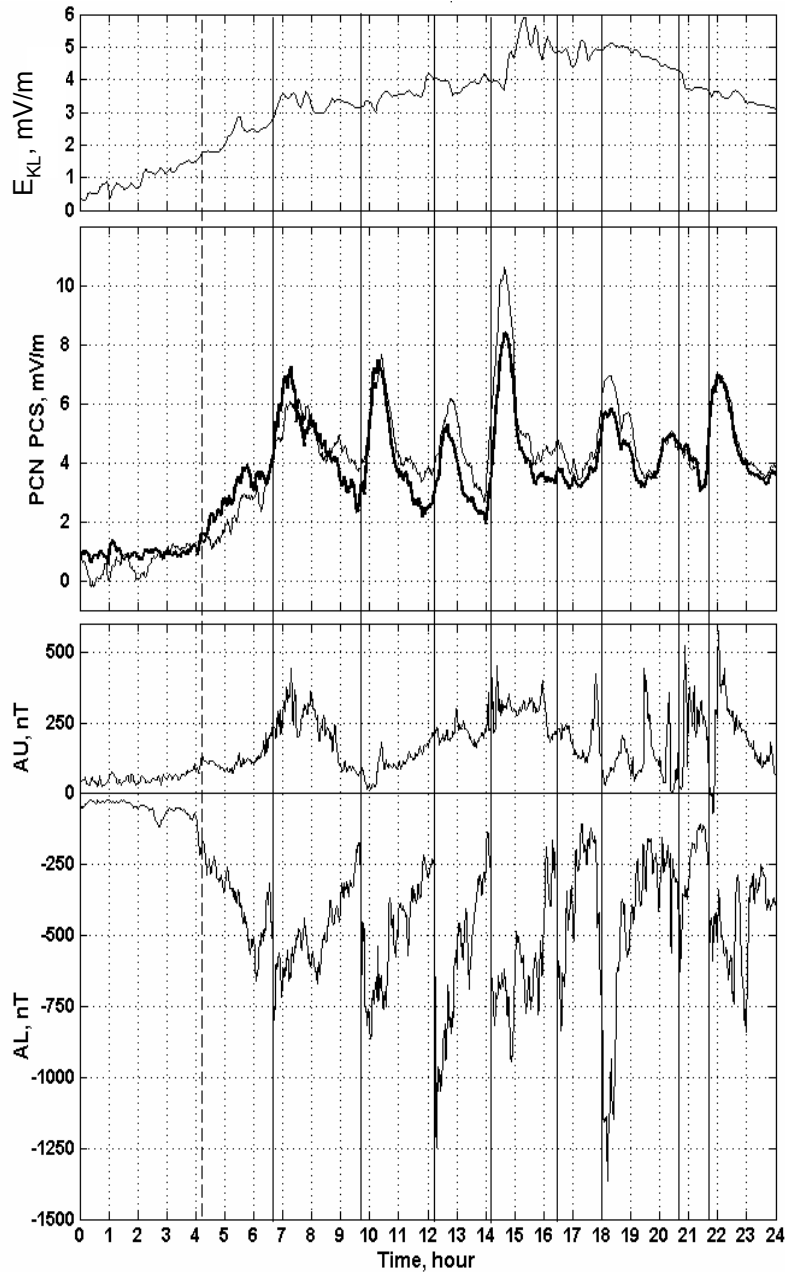
Вначале пилообразные возмущения были выделены как особый класс возмущений, по причине их чёткой периодичности, но затем было сделан вывод, что они являются обычными квази-периодическими суббурями (Huang *et al.*, 2003, 2004; Lui *et al.*, 2004; Henderson *et al.*, 2006a,b; Clauer *et al.*, 2006 и отличаются от обычных суббурь только значительно большей протяжённостью вдоль авроральной зоны (Kitamura *et al.*, 2005; Clauer *et al.*, 2006).

Sawtooth суббури происходят при высокой скорости солнечного ветра и южной ориентации межпланетного магнитного поля (ММП), при этом южная B_z компонента может либо осциллировать, либо быть стабильной. Наиболее мощные sawtooth суббури, сопровождающиеся мировыми магнитными бурями, наблюдаются при стабильно-высоких значениях южной компоненты ММП.

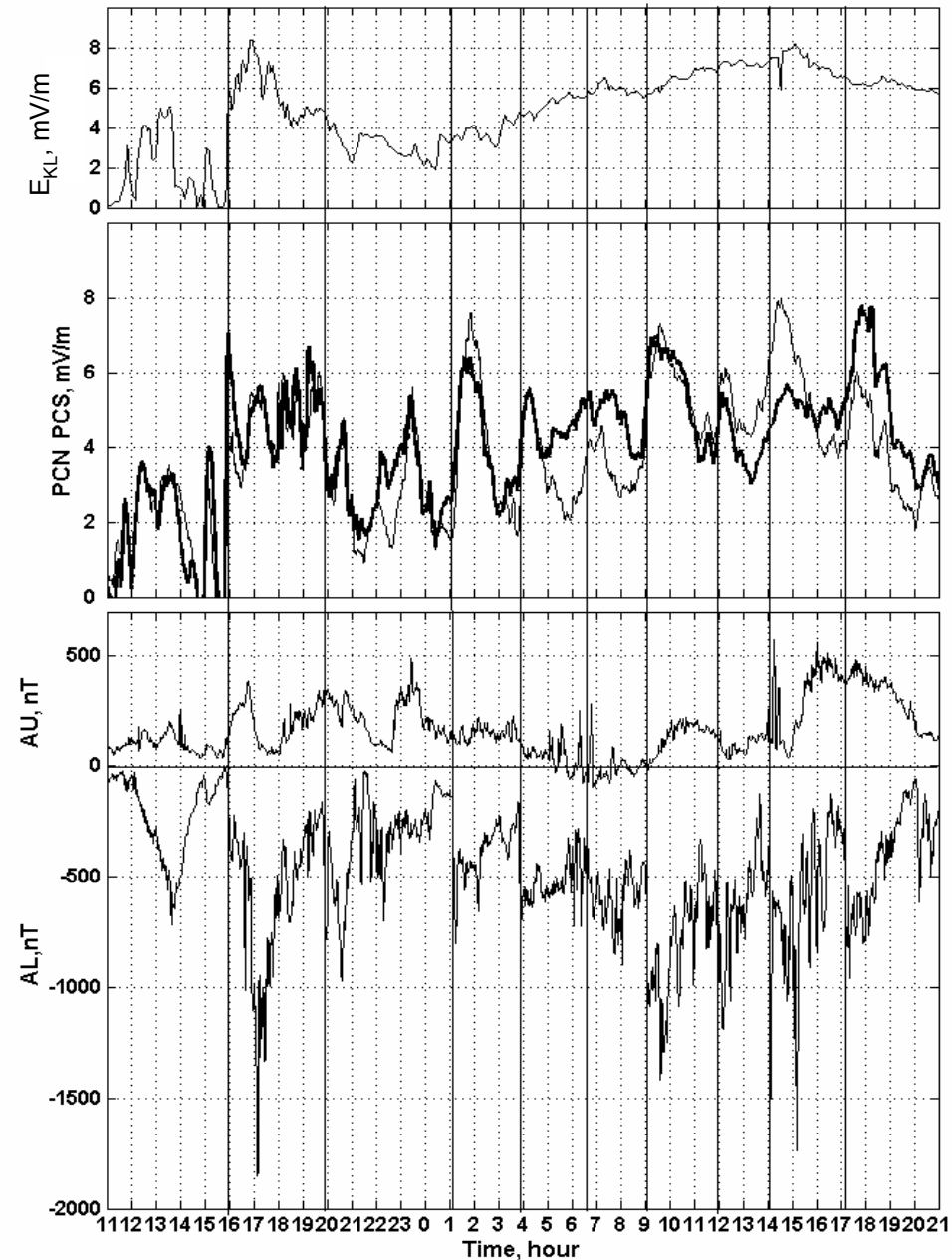
Типичным образцом мощных sawtooth суббурь являются события 4 октября 2000г и 19/20 марта 2001, рассмотренные в недавно-опубликованной работе (Troshichev O, Stauning P, Liou K, Reeves G, Saw-tooth substorms: Inconsistency of repetitive bay-like magnetic disturbances with behavior of aurora, *Advances in Space Research*, 47, 702–709, 2011)

Пилообразные суббури (sawtooth substorms)

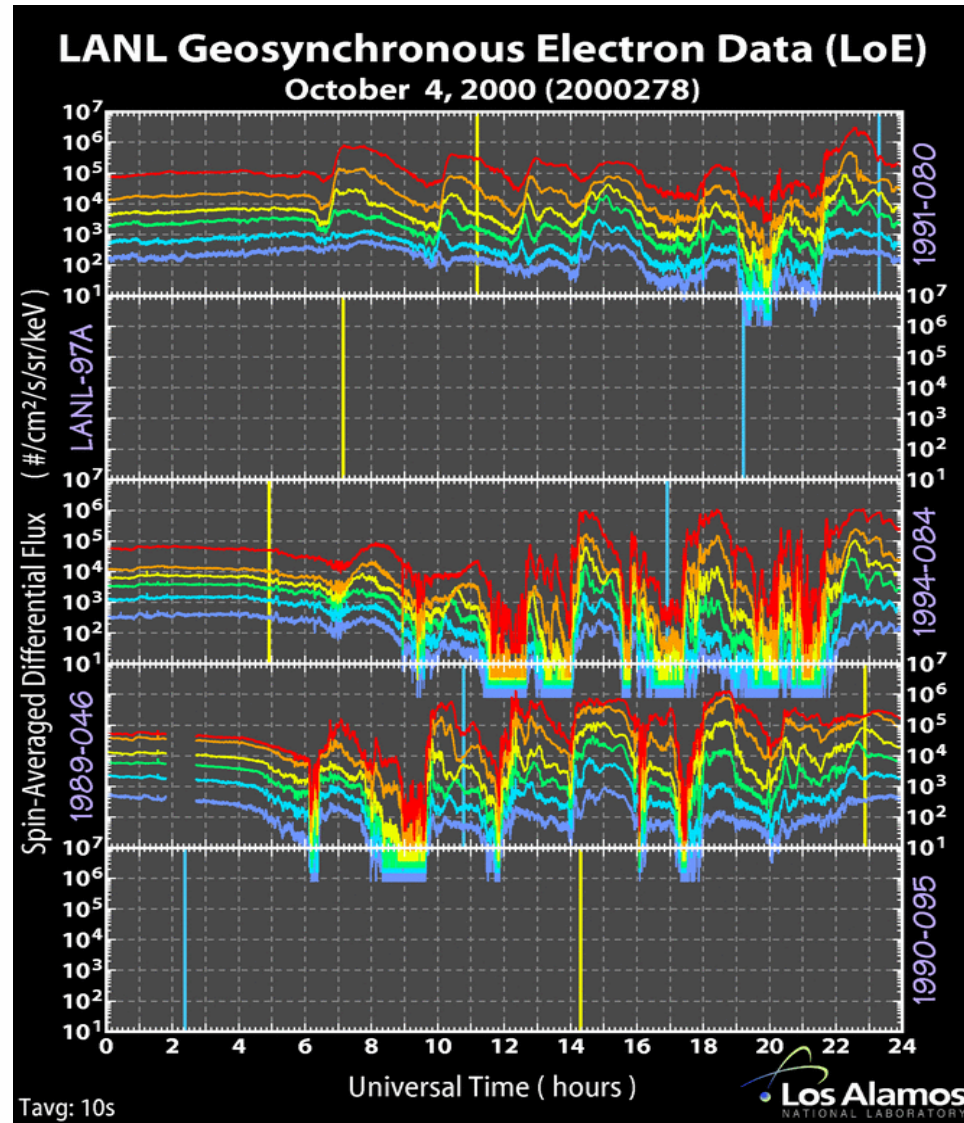
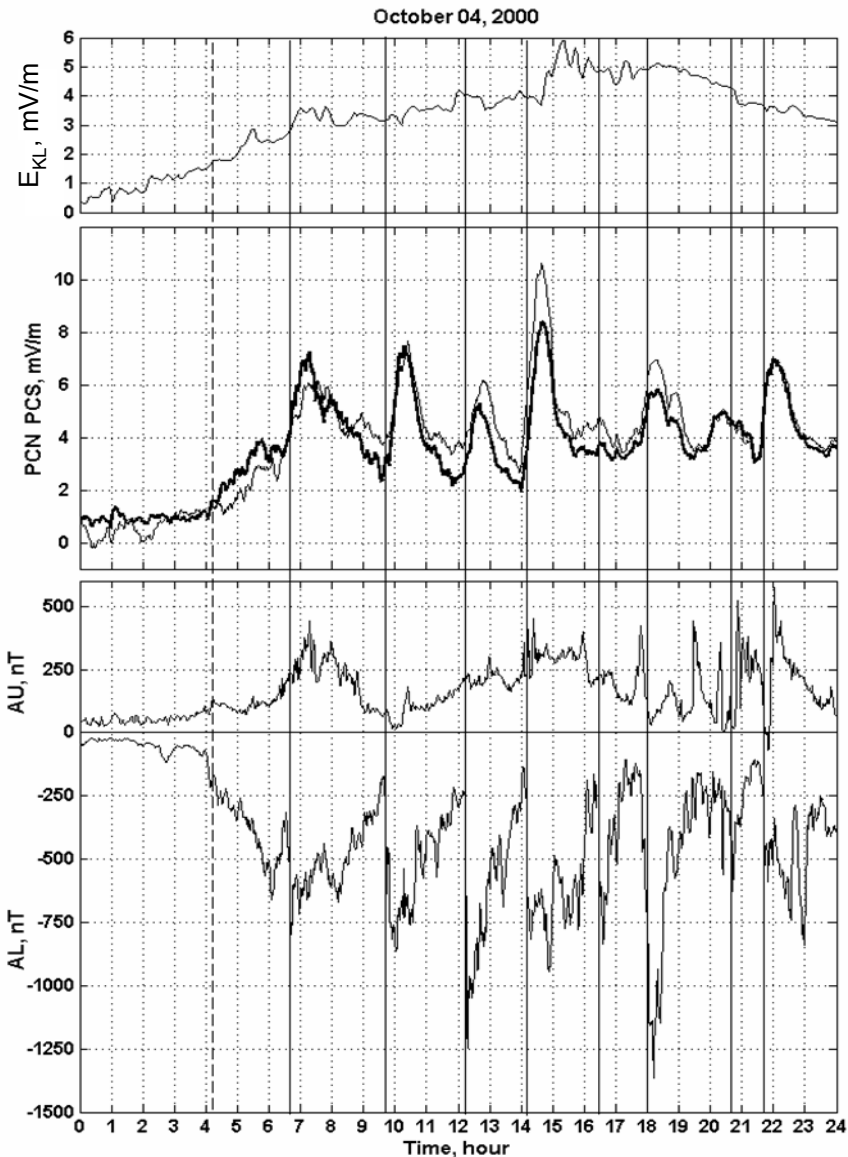
(а) 4 октября 2000г



(б) 20 марта 2001

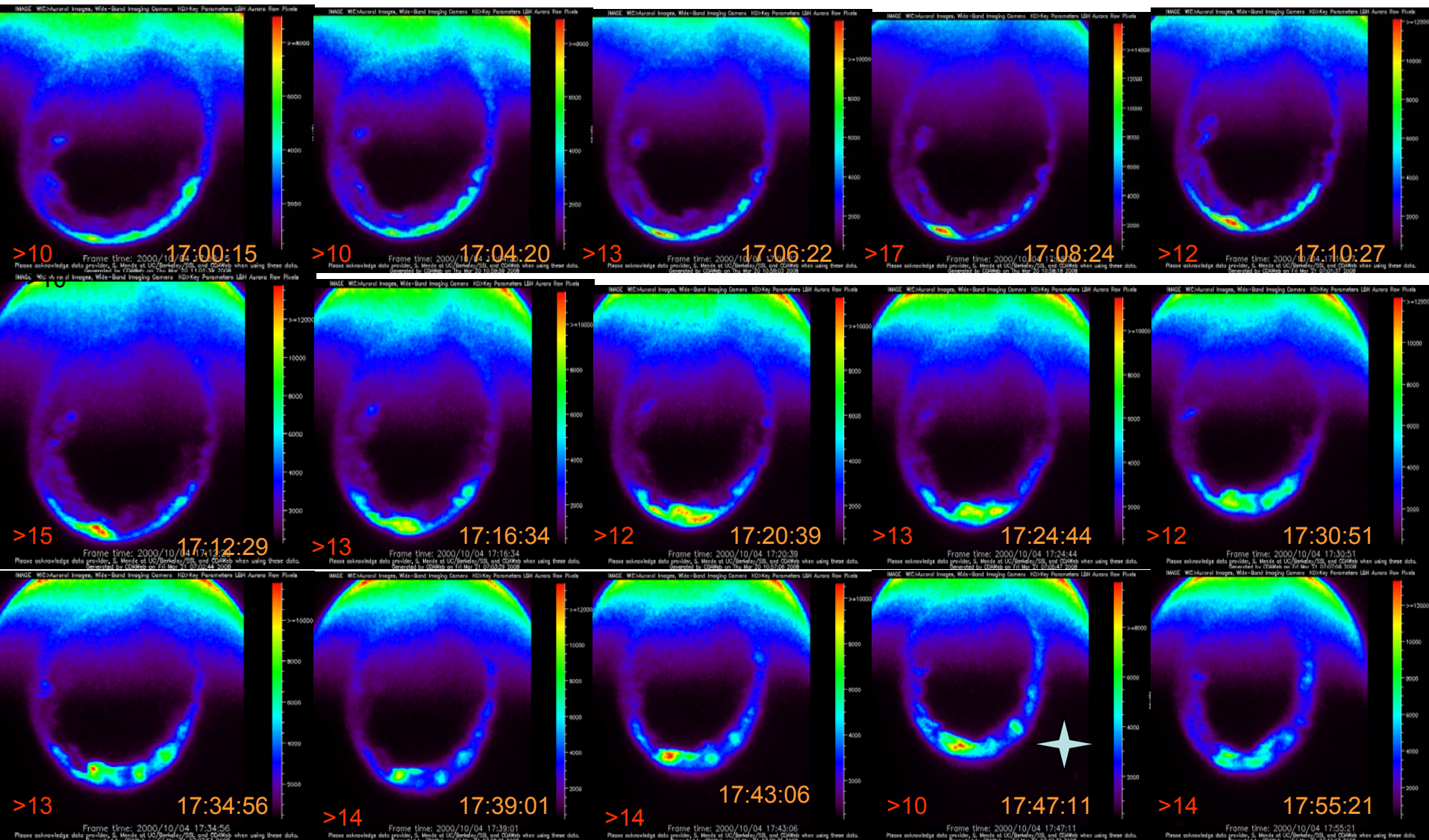


Суббуря 4 октября 4, 2000

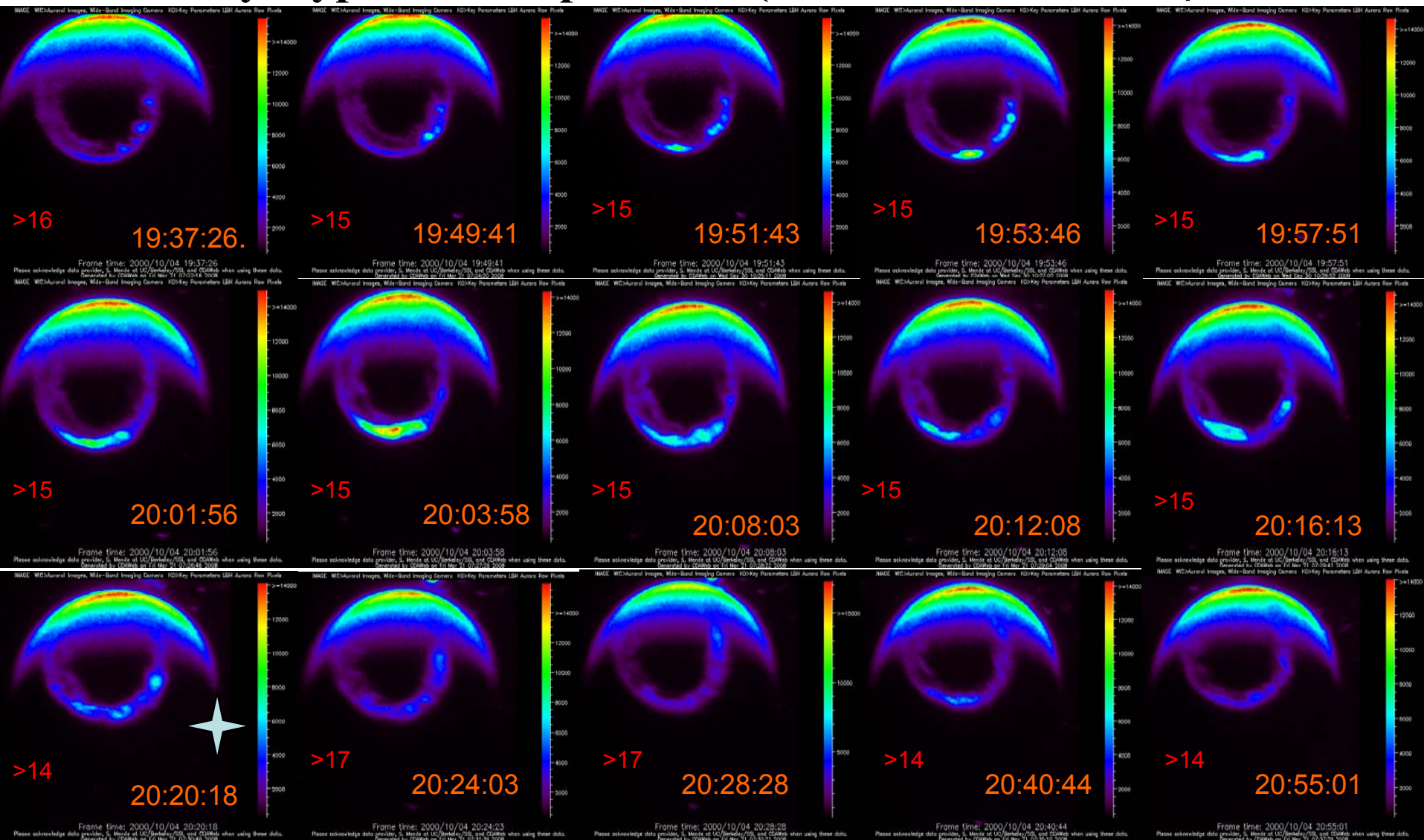


Магнитные возмущения ($AL > 750$ nT) с внезапным началом в 06.35, 09.42, 12.13, 14.03, 16.02, 17.47, 20.20 и 21.39 UT. Наиболее близкие по времени инъекции электронов на геосинхронной орбите были зафиксированы в 06.09, 09.34, 11.50, 14.00, 15.50, 17.22, 19.59, and 21.31 UT, т.е. раньше на 3 - 26 минут, чем начало магнитных возмущений.

Суббуря 4 октября 2000г (17:00:15 – 17:55:21 UT)



Суббуря 4 октября 2000г (19:37:26 - 20:55:01 UT)

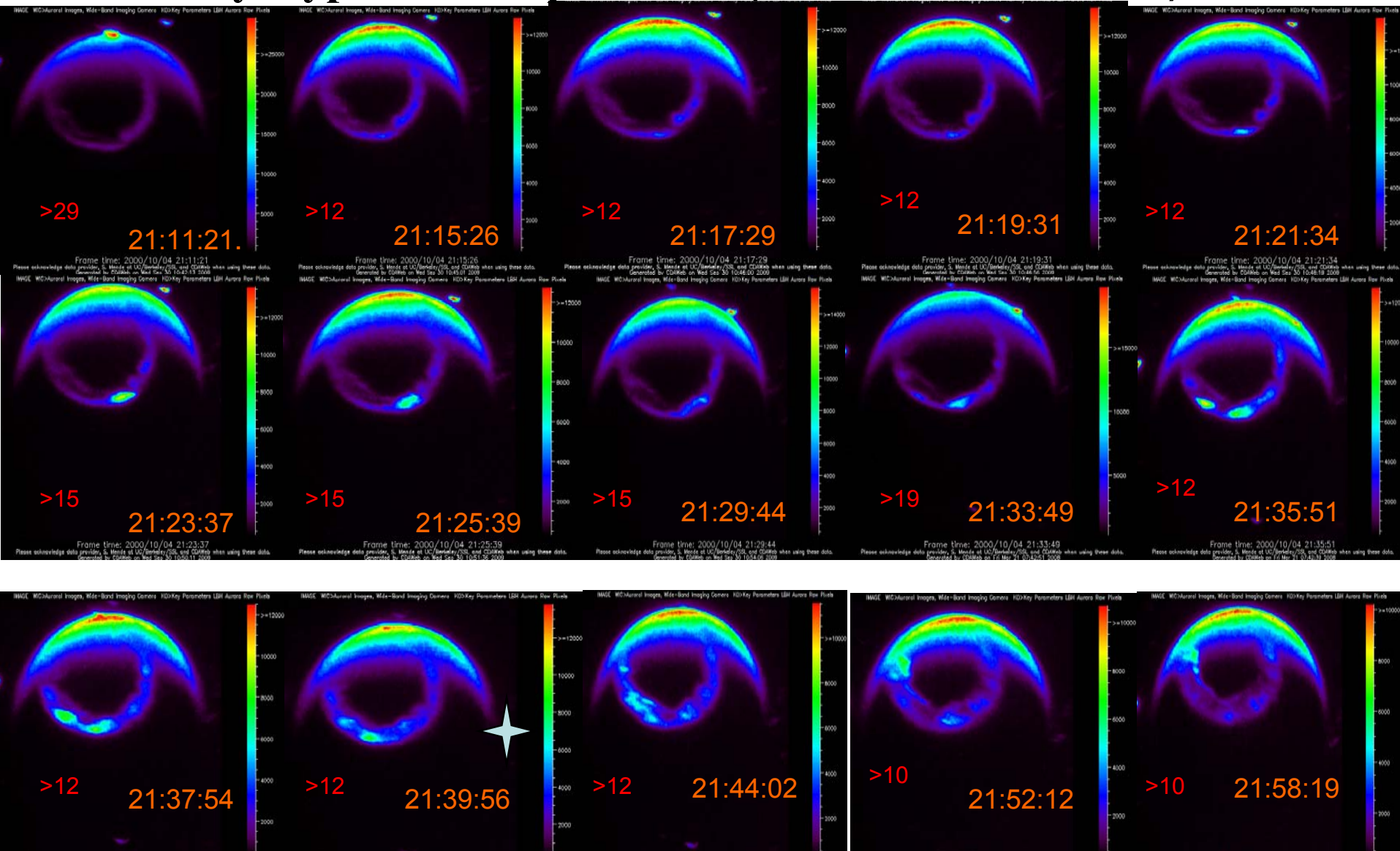


Шкала интенсивности свечения одинакова (>14 or >15) на всех кадрах.

Авроральный брейкап зафиксирован в 19:50 UT на фоне постоянно высокой авроральной активности (двойной овал).

Магнитное возмущение началось в 20:20 UT, через 30 мин после аврорального брейкапа и через 21 мин после 7 инъекции частиц на синхронную орбиту.

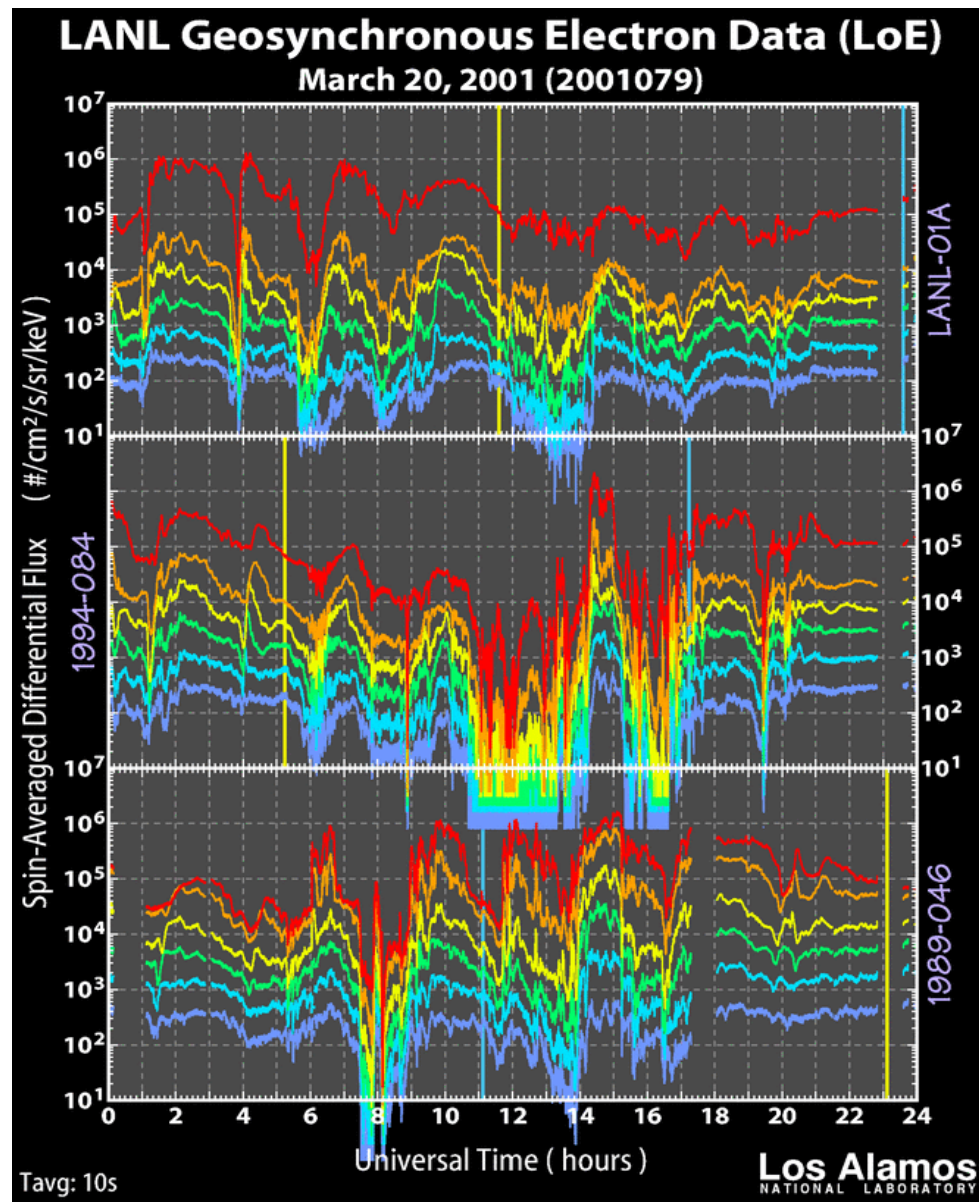
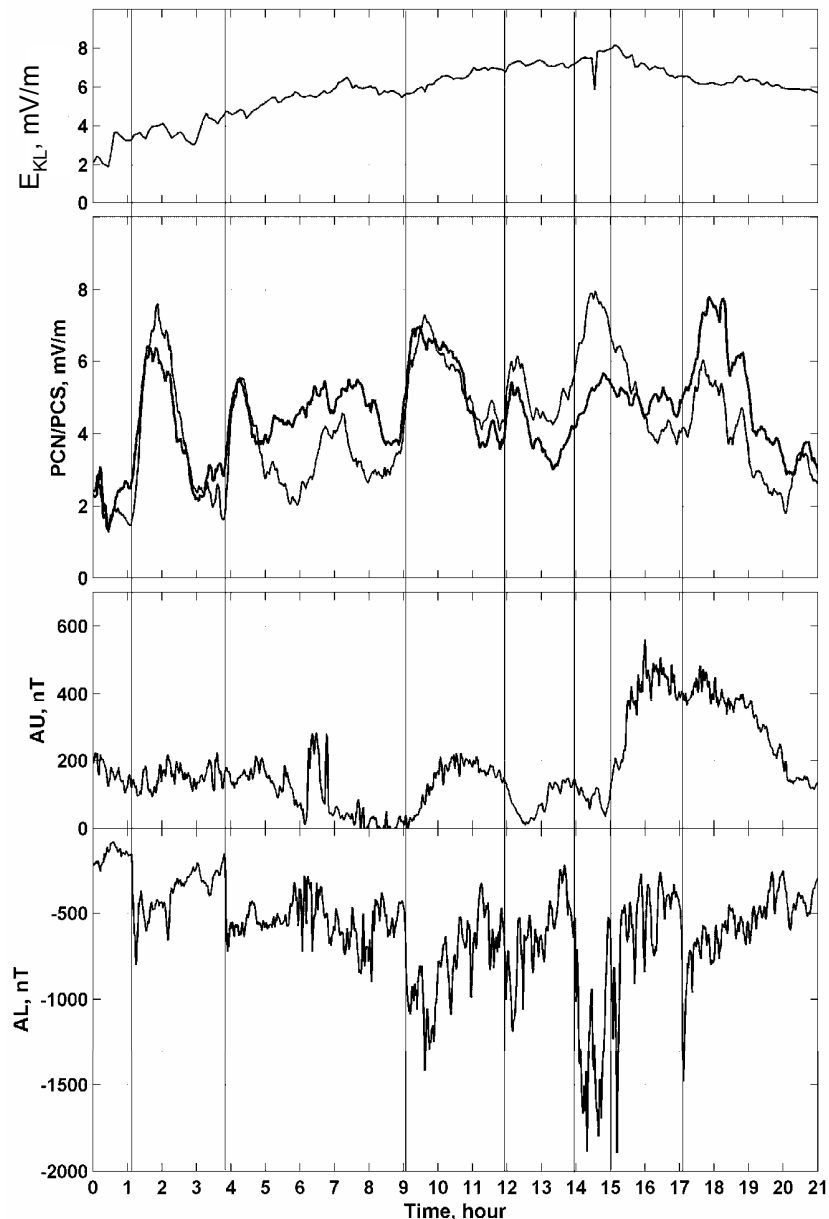
Суббуря 4 октября 2000г (21:11:21 - 21:58:19 UT)



Шкала интенсивности меняется в пределах от >10 до >15, за исключением кадров в 21.11 (>29) и 21.34 UT (>19).

Усиление яркости аврорального свечения, отмеченное в 21.24UT, происходит на фоне постоянно высокой авроральной активности (см. снимок в 21.11 UT). Начало магнитного возмущения в 21.39 UT, через 15 минут после максимума аврорального свечения и через 18 минут после инъекции частиц.

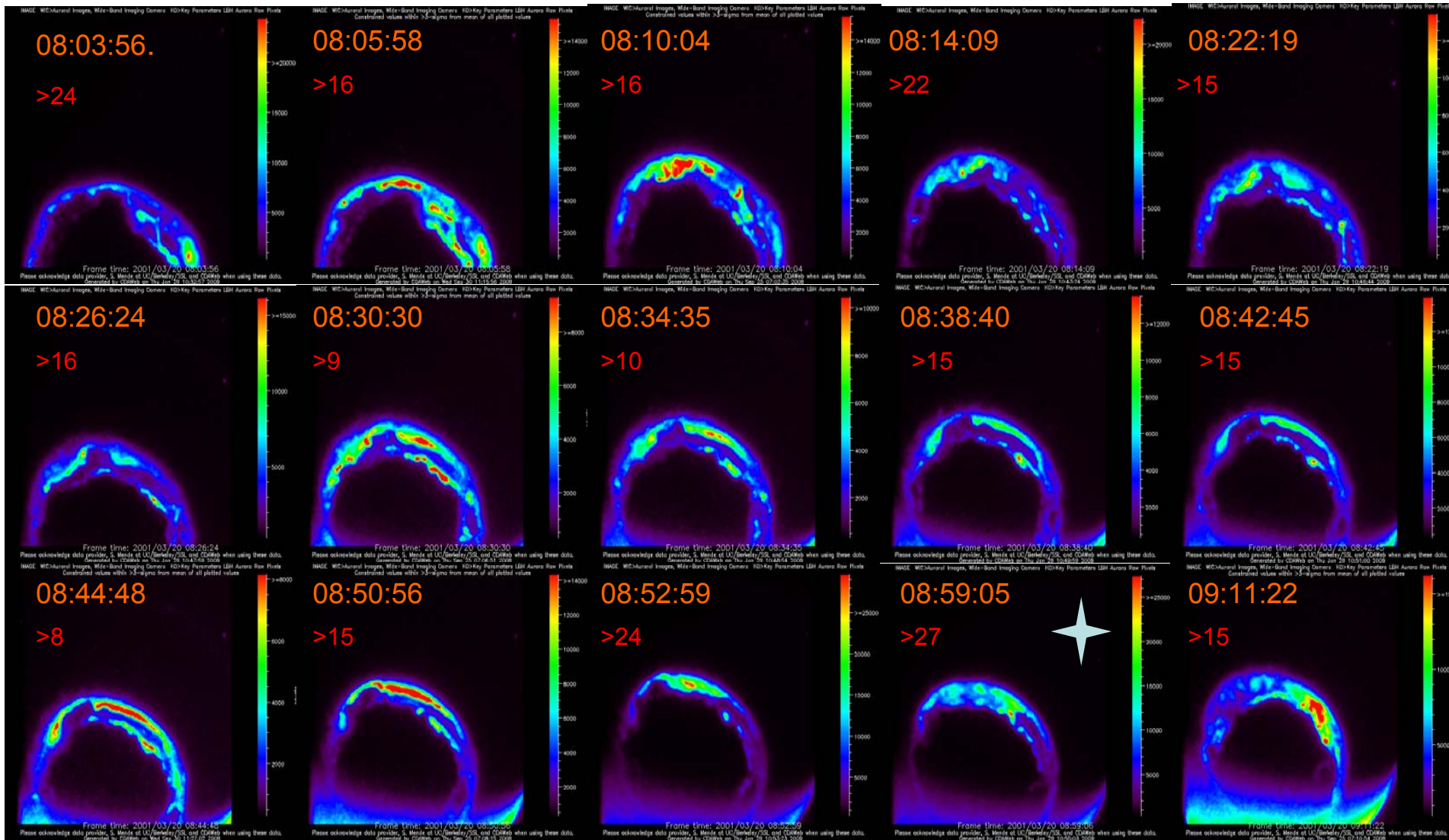
Суббуря 20 марта 2001г.



Суббуря 20 марта 2001г происходила под воздействием очень интенсивного межпланетного электрического поля. Внезапное начало магнитных возмущений наблюдалось в 01.08, 03.52, 09.04, 11.55, 13.53, 15.00 и 17.03 UT.

Инжекция частиц на геосинхронную орбиту была зафиксирована в 01.05, 03.54, 08.45, 11.40, 13.40, 14.15, и 16.40 UT.

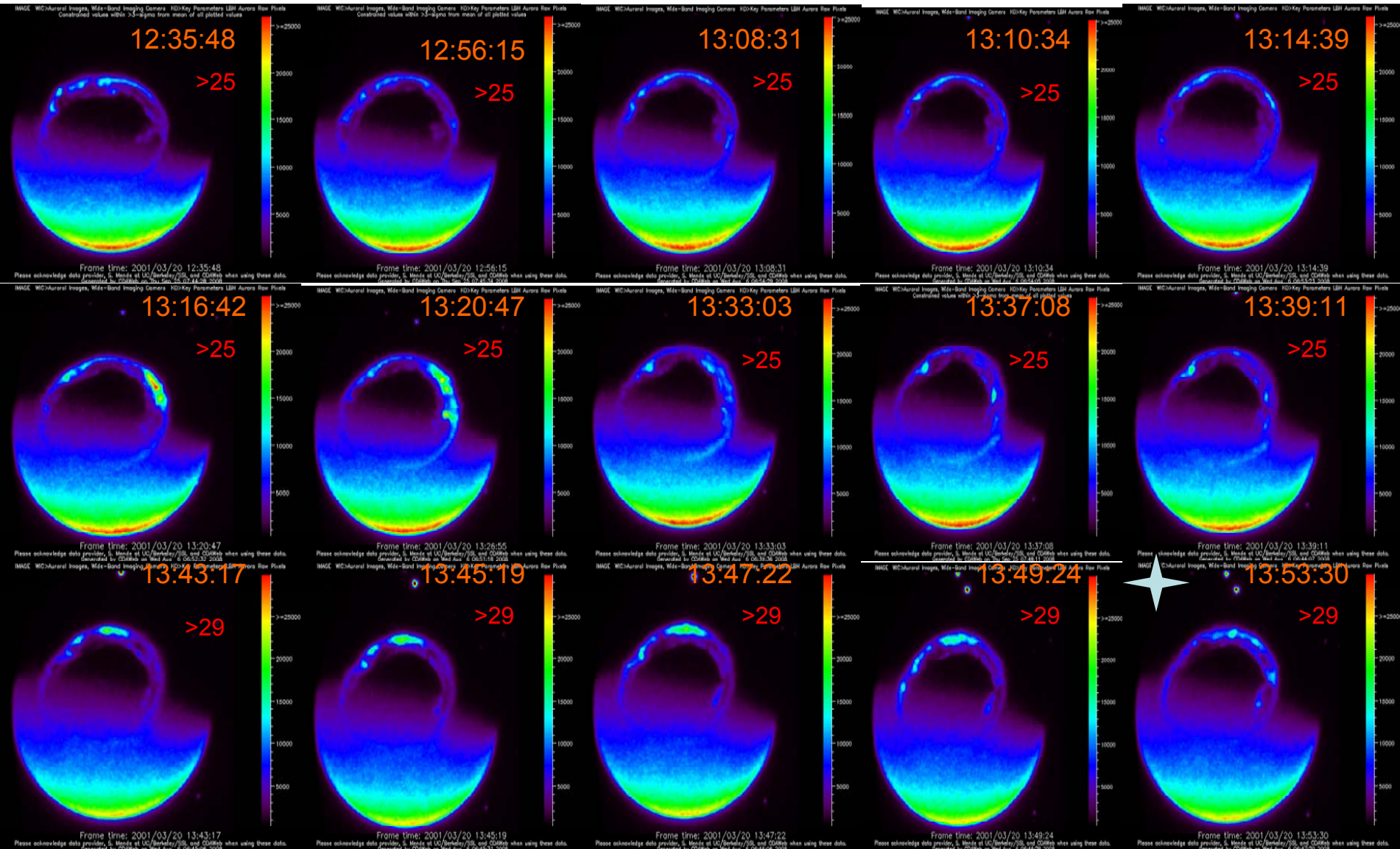
Суббуря 20 марта 2001 (08:03:56 - 09:11:22 UT)



Переменная шкала интенсивности свечения: от >8 до >27;

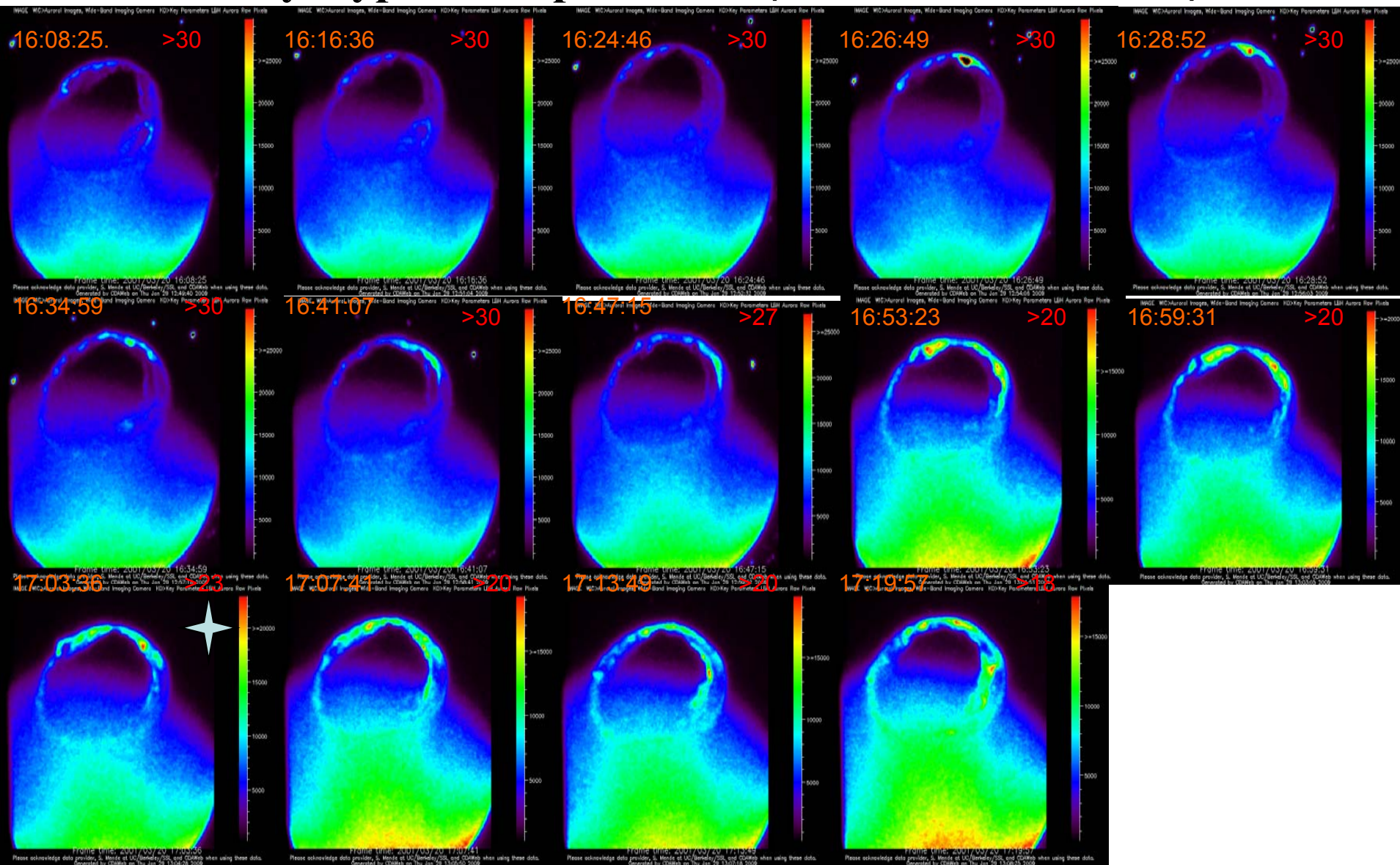
Магнитное возмущение началось в 08.59 на фоне очень высокой авроральной активности (двойной овал в утреннем и вечернем секторах в течение всего периода).

Суббуря 20 марта 201г (12:35:48 - 13:53:30 UT)



Очень высокий уровень авроральной активности в течение всего периода (шкала светимости постоянная > 25)
Уярчение сияний было зафиксировано около 13.11 и 13.39 UT, инжекция частиц в 13.15 и 13.40 UT).
Начало магнитных возмущений наблюдалось в 13.53 UT, через 13 минут после инжекции частиц и уярчения сияний.

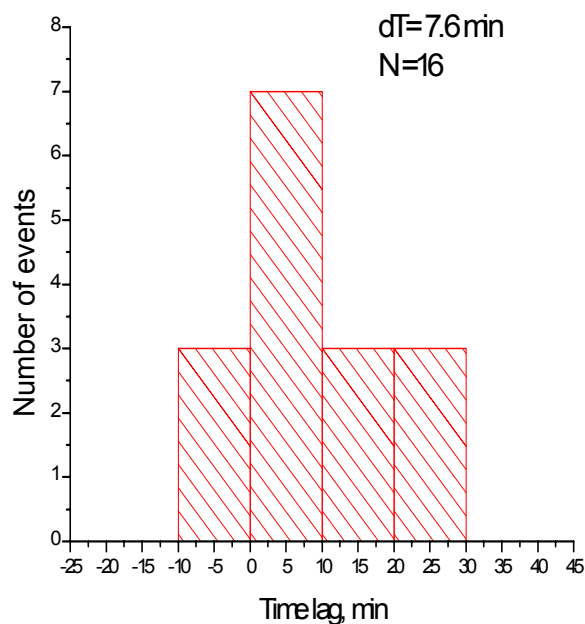
Суббуря 20 марта 2001г (16:08:25 - 17:19:57 UT)



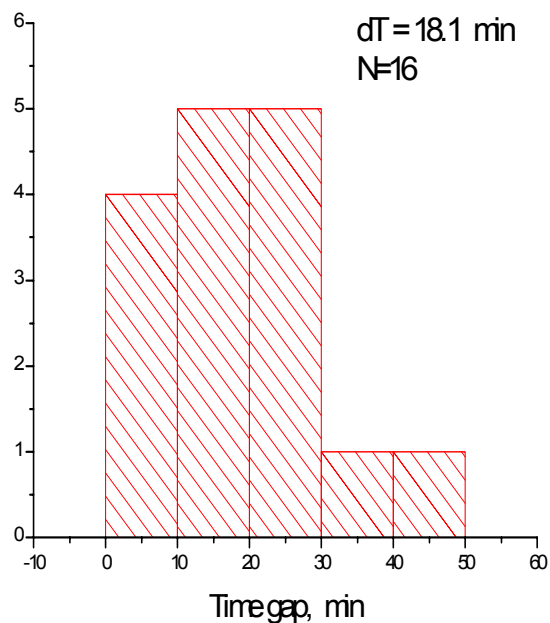
Очень высокий уровень авроральной активности в течение всего периода (шкала светимости между 20 и 30). Уярчение сияний зафиксировано в 16.27 и 16.47 UT, инъекция частиц на геосинхронной орбите в 16.40 UT.2. Магнитное возмущение началось в 17.03 UT, через 16 мин после уярчения и 23 мин после инъекции частиц.

Временная задержка (а) инъекции частиц на геосинхронной орбите относительно начала авроральной суббури, (б) начала магнитной суббури относительно начала авроральной суббури, (в) начала магнитной суббури относительно инъекции частиц на геосинхронной орбите

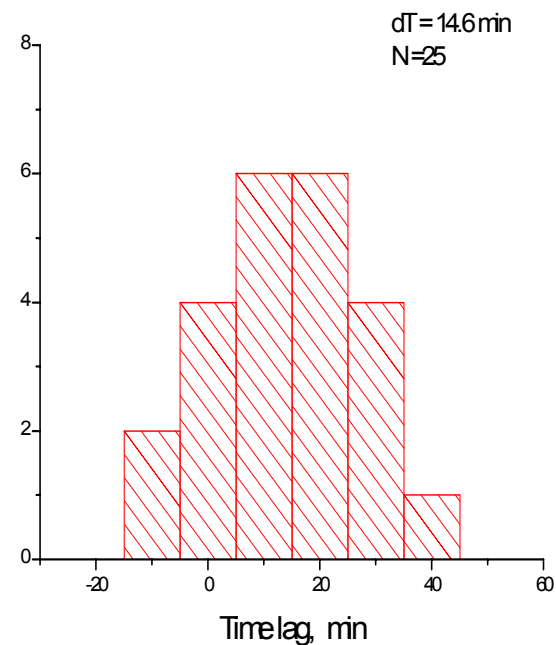
(a) Delay of particle injections relative to aurora onsets



(b) Delay of magnetic onsets relative to aurora onsets



(c) Magnetic onsets delay relative to particle injections



Результаты анализа:

- Несоответствие между поведением сияний и магнитными возмущениями является типичным для сильных **sawtooth суббурь**, происходящих при непрерывном воздействии на магнитосферу интенсивного межпланетного электрического поля E_{KL} (Kan and Lee, 1979)

$$E_{KL} = vB_T \sin^2 \theta / 2$$

- Магнитные **sawtooth возмущения** начинаются на фоне высокой авроральной активности, для них типична структура двойного аврорального овала (double oval).
- Интенсивность **sawtooth возмущений** (магнитуда магнитных возмущений и общий уровень яркости сияний) зависит от величины геоэффективного межпланетного электрического поля E_{KL}

Считающаяся универсальной «классическая модель» авроральной суббури [Akasofu, 1964, 1968] не работает в случае магнитосферных sawtooth суббурь, которые развиваются на фоне непрерывного и интенсивного высыпания авроральных электронов, обеспечивающих стабильно высокую проводимость авроральной ионосферы.

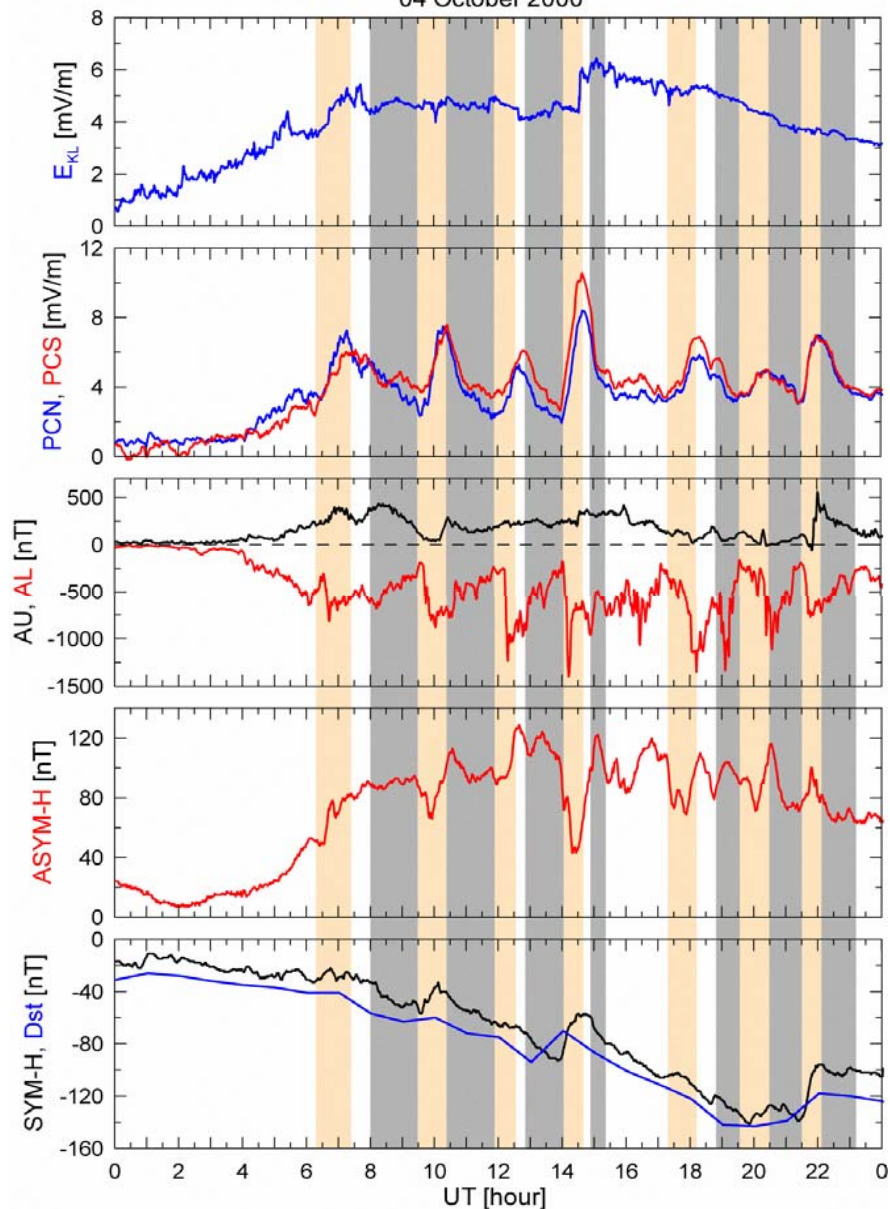
Специфические черты магнитосферных sawtooth суббурь:

- Периодичность усилений и понижений магнитной активности в полярных шапках (PC индекс) при стабильно высоком уровне электрического поля E_{KL} воздействующего на магнитосферу
- Строгое соответствие между вариациями магнитной активности в полярной шапке и развитием магнитных возмущений в авроральной зоне.

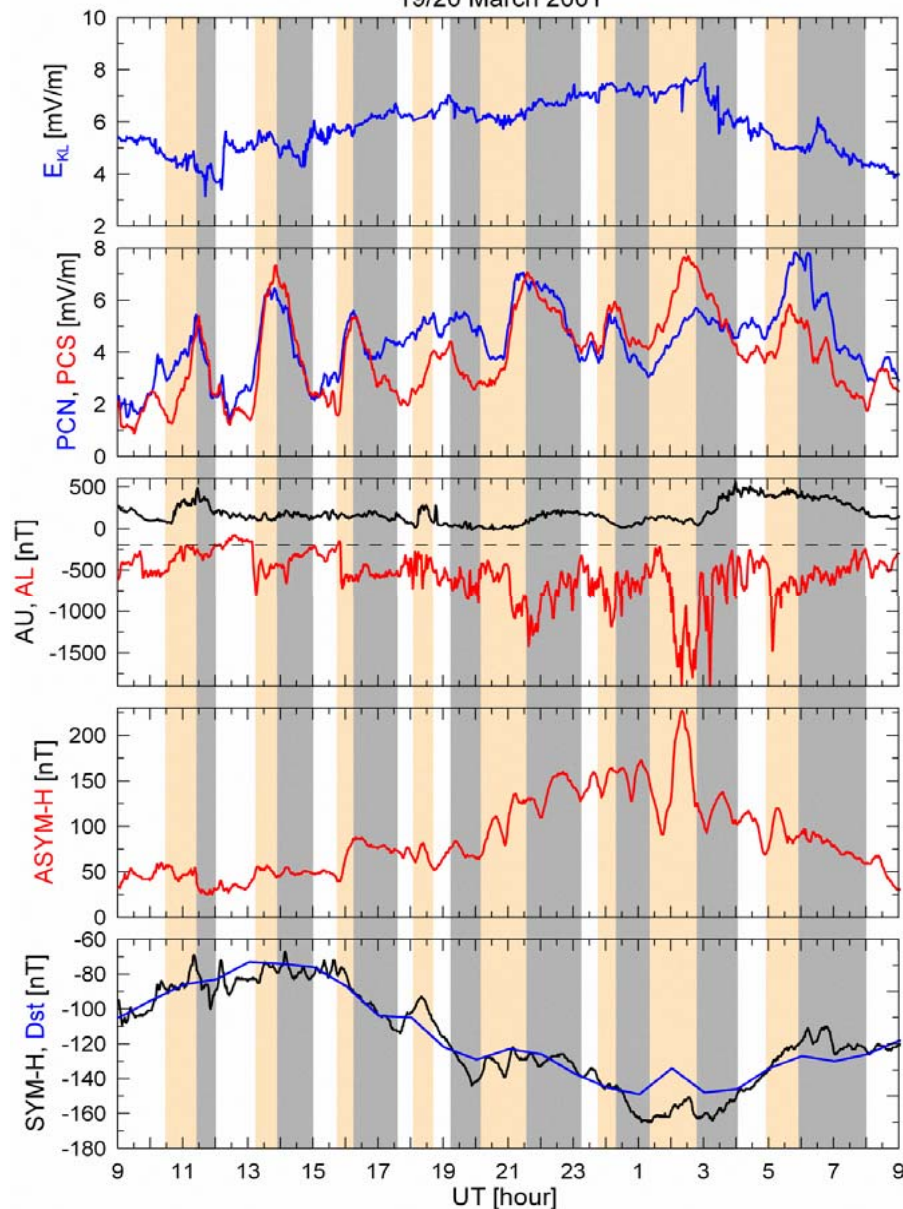
Специфические черты магнитосферных sawtooth суббурь:

Строгое соответствие между магнитными возмущениями в полярной шапке и авроральной зоне и периодичность изменений магнитной активности в условиях стабильного E_{KL} .

04 October 2000



19/20 March 2001



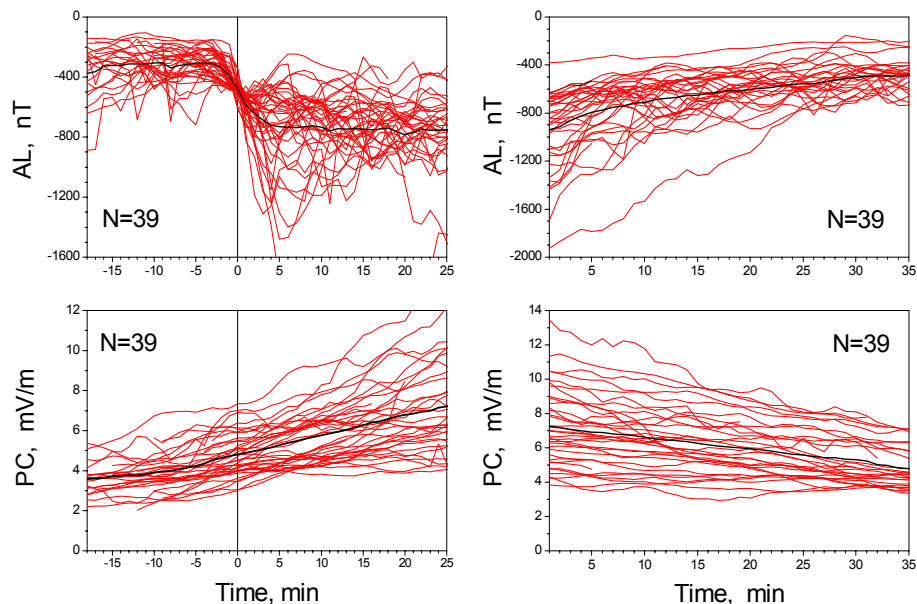
Особенности развития sawtooth суббурь:

PC индекс как индикатор фазы роста (PC growth) и фазы затухания (PC decline) суббури: соотношение между ходом PC и AL индексов

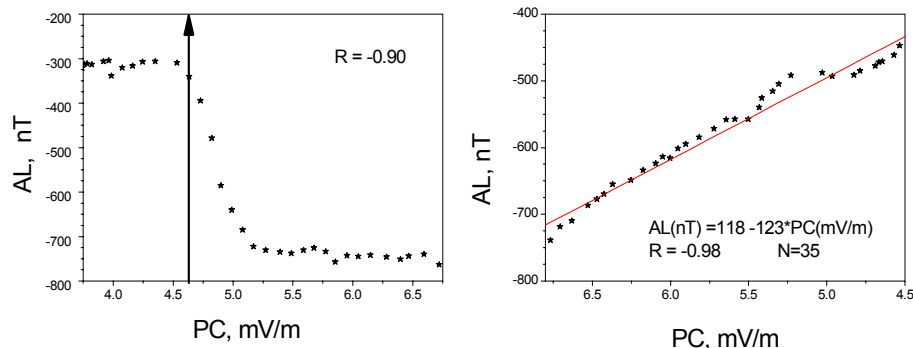
Sawtooth substorms

PC growth phase

PC decline phase



AL vs PC



На Рисунках вверху красным цветом показаны вариации магнитной активности в авроральной зоне (*AL* индекс) и в полярной шапке (*PC* индекс) на фазах роста и спада для 39 конкретных sawtooth суббурь; чёрным цветом показан усреднённый ход *AL* и *PC* индексов

На Рисунке внизу - соотношение между средними значениями *PC* и *AL* на фазе роста и фазе спада суббури.

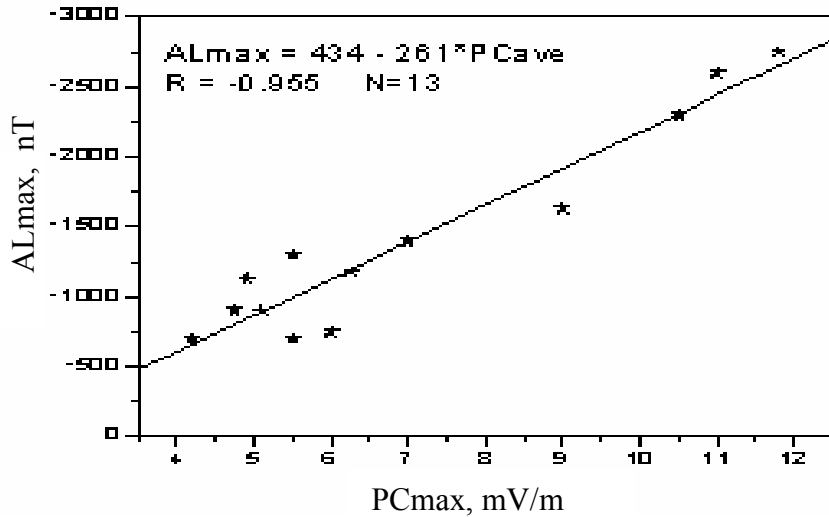
Результат:

- Рост магнитной активности в полярной шапке является предвестником (15-20 мин) внезапного начала магнитного возмущения в авроральной зоне
- Скорость роста *PC* индекса не зависит от хода суббури, пока интенсивность возмущения не достигнет максимума
- После достижения максимальной возмущённости *PC* и *AL* синхронно убывают.

Особенности развития sawtooth суббурь:

- (а) - зависимость интенсивности суббури (ALmax) от величины РС индекса,
(б) – зависимость спада AL на фазе затухания (dALdec) от интенсивности суббури

(а) ALmax vs PCmax

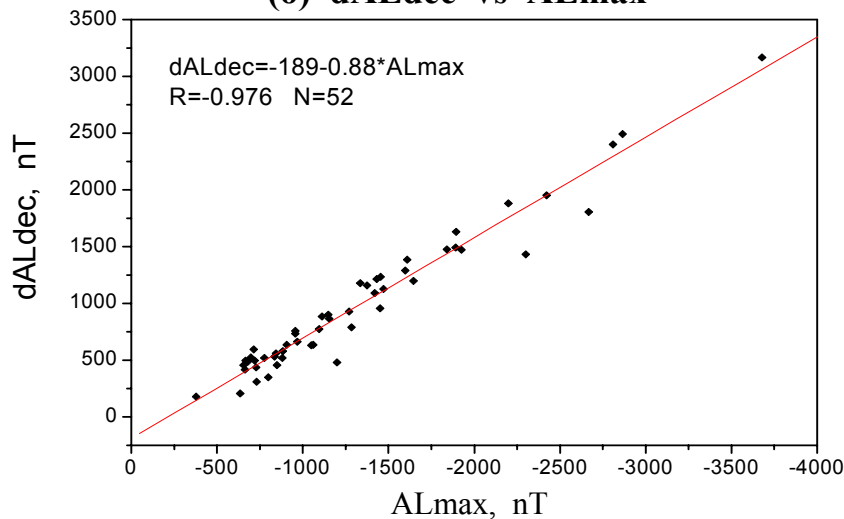


Для каждого из 13 событий (возмущённых периодов) с sawtooth суббурями оценена средняя для события интенсивность суббури (ALmax) и максимальная интенсивность магнитной активности в полярной шапке (PCmax).

Результат:

Величины (ALmax) и (PCmax) находятся в линейной зависимости.

(б) dALdec vs ALmax



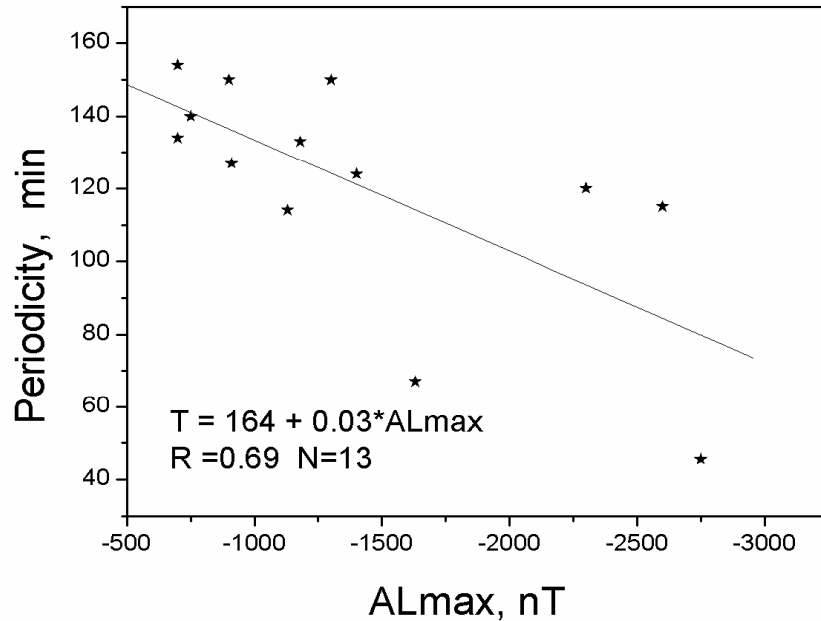
Для всех анализируемых sawtooth суббурь (N=52) рассмотрено соотношение между величиной уменьшения AL индекса на фазе спада (dALdec) и интенсивностью суббури (ALmax).

Результат:

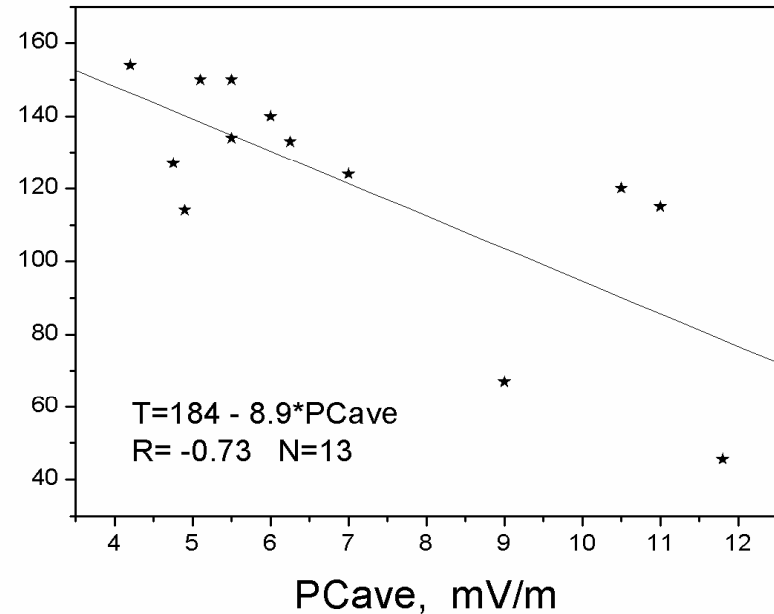
Величина уменьшения AL индекса на фазе затухания (от максимума суббури до базового уровня) определяется интенсивностью суббури

Особенности развития sawtooth суббури: что определяет их периодичность?

(a) Periodicity vs. ALmax



(b) Periodicity vs. PCave



Для каждого из 13 событий (возмущённых периодов) рассмотрена зависимость средней для события длительности суббури от (а) интенсивности суббури (ALmax) и (б) средней величины максимальной интенсивности магнитной активности в полярной шапке (PCave).

Результат:

Периодичность sawtooth суббури зависит от интенсивности суббури (и магнитной активности в полярной шапке): чем выше PC индекс и интенсивность суббури (ALmax), тем меньше длительность суббури

Механизм периодичности в развитии sawtooth суббурь

Интенсивность мощных магнитных возмущений (**sawtooth суббурь**) периодически возрастает и уменьшается, несмотря на постоянно высокий уровень геоэффективного электрического поля E_{KL} , действующего на магнитосферу.

Очевидно, что магнитная активность в полярных шапках (PC индекс) на фазе роста не зависит от развития суббури и обусловлена (как и в случае изолированных суббурь), эффективным поступлением энергии солнечного ветра в магнитосферу (т.е. постоянным воздействием электрического поля E_{KL}

Основная проблема sawtooth суббурь:

- Почему магнитная активность в полярных шапках и авроральной зоне периодически затухает в условиях стабильной накачки энергии солнечного ветра в магнитосферу?
- Почему спад магнитной активности в полярной шапке и авроральной зоне происходит синхронно?

Предполагаемый механизм периодического затухания sawtooth суббурь:

В условиях постоянно высокой проводимости ионосферы периодичность магнитных возмущений определяется вариациями интенсивности токов в высокоширотной магнитосферно-ионосферной токовой системе.

Высокая проводимость авроральной ионосферы обеспечивает экстремальное усиление магнитосферных токов в зоне FAC R1 на приполюсной границе аврорального овала.

Следствием экстремального усиления продольных магнитосферных токов будет разрядка, в большей или меньшей степени, “магнитосферного конденсатора”, ответственного за генерацию продольных токов в зоне R1.

Следствием разрядки магнитосферного конденсатора будет спад интенсивности продольных токов, ведущий к понижению потенциала полярной шапки и всей высокоширотной системы электрических полей и токов.

Как только вся система вернётся к базовому состоянию, магнитосферный конденсатор начинает заряжаться снова благодаря постоянной накачке энергии солнечного ветра в магнитосферу.

Экспериментальные свидетельства в поддержку концепции магнитосферного конденсатора

- Зоны продольных токов R1 и R2 (*Iijima and Potemra, 1976 a,b*) лежат в границах аврорального овала, где происходит высыпание авроральных частиц (*Zmuda and Armstrong, 1974; Cloutier and Anderson, 1975; Klumpar et al., 1976; Kamide and Akasofu, 1976; Meng, 1976; McDiarmid et al., 1977; Kamide and Rostoker, 1977; Maier et al., 1980; Burch, 1988; Kamide and Baumjohann, 1993; Ohtani et al., 1995*) и, следовательно, интенсивность аврорального высыпания, при достижении определённого критического уровня, будет определять силу продольных токов.
- Зоны продольных токов R1 и R2 во всех моделях магнитосферы (*Fairfield and Mead, 1975; Tsyganenko, 1996, 2002*) локализованы в пределах замкнутой магнитосферы (*Antonova and Ganushkina, 1997; Chan and Russel, 2000; Antonova et al., 2006*).
- Данные спутниковых измерений параметров плазмы в экваториальной магнитосфере свидетельствуют, что величина градиентов плазменного давления достаточна для генерации наблюдаемой интенсивности продольных токов (*Iijima et al., 1997; Wing and Newell, 1998, 2000; Xing et al., 2009;)*
- Азимутальные градиенты плазменного давления, поддерживающие в спокойное время токи зоны R1 были определены в работах (*Stepanova et al., 2004, 2006*).
- Продольные токи R1 в периоды возмущений имеют ограничение по интенсивности вследствие конечной величины азимутальных градиентов плазмы в магнитосфере (*Antonova et al., 2006*).

Выводы

Sawtooth возмущения происходят на фоне высокой авроральной активности, что указывает на стабильно высокую проводимость авроральной ионосферы в ходе Sawtooth суббурь.

Экстремально высокая проводимость авроральной ионосферы является условием резкого роста продольных магнитосферных токов в зонах R1 и R2.

Предлагается гипотеза, в которой периодичность Sawtooth суббурь определяется соотношением двух противоположно направленных процессов в магнитосфере, таких как:

- зарядка «магнитосферного конденсатора», ответственного за генерацию продольных электрических токов в магнитосфере и обеспечение ионосферных электрических полей и токов в полярной шапке и авроральной зоне, и
- разрядка «магнитосферного конденсатора», стартующая, когда интенсивность продольных магнитосферных токов достигает определённого порога.

Первый процесс (фаза роста РС индекса) контролируется скоростью накачки энергии солнечного ветра в магнитосферу: чем выше скорость накачки, тем интенсивнее продольные магнитосферные токи, тем мощнее суббуря, тем короче фаза роста. Второй процесс (фаза спада РС и AL индексов) контролируется максимальной интенсивностью продольных токов (чем выше сила тока, тем короче время разрядки). Соотношение этих двух процессов определяет длительность sawtooth суббури (чем мощнее суббуря, тем короче её длительность).

Интенсивность sawtooth возмущений (т.е. общий уровень яркости сияний и магнитуда магнитных возмущений) зависит от величины геоэффективного межпланетного электрического поля E_{KL} .

Устойчивость периода повторения sawtooth суббурь определяется неизменностью величины поля E_{KL} : тем стабильнее поле E_{KL} , тем строже периодичность развития суббурь.

Благодарю за внимание!

Space Weather Monitoring by Ground-based Means demonstrates that, when estimated properly, the magnetic activity in the polar cap is an adequate indicator of the solar wind energy that enters into the magnetosphere. As a result, the polar cap magnetic activity index *PC* starts to grow prior to the onset of the magnetospheric substorms and magnetic storms, and intensity of magnetospheric disturbances is successfully estimated by the *PC* growth rate.

The book discusses the fact that the polar cap magnetic activity is very sensitive to geoeffective changes of the solar wind parameters and, as a result, can be used to monitor solar wind variations and their effect on the magnetosphere, i.e. solar weather. It describes new and reliable methods of space weather monitoring and shows how the unified procedure provides consistent data from northern and southern polar regions irrespective of the UT time, season, and solar cycle.

ISBN: 978-3-642-16802-4

springer.com
www.praxis-publishing.co.uk



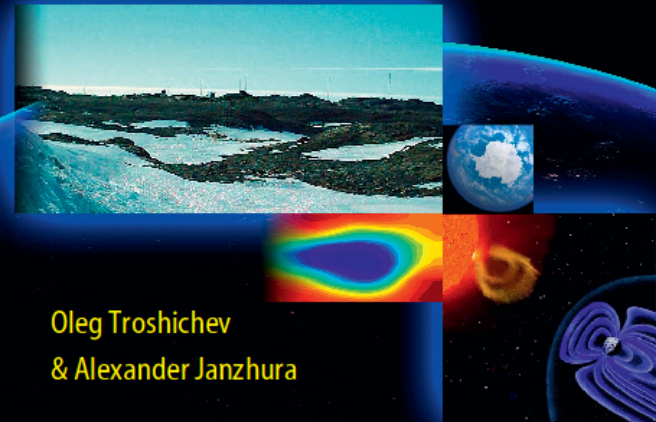
Troshichev & Janzhura



SPACE WEATHER MONITORING BY
GROUND-BASED MEANS *PC* index

SPACE WEATHER MONITORING BY GROUND-BASED MEANS

PC index



Oleg Troshichev
& Alexander Janzhura

Springer

