



Структура «суббурового токового клина» (SCW) ответственного за развитие западного электроджета в ходе взрывной фазы суббури

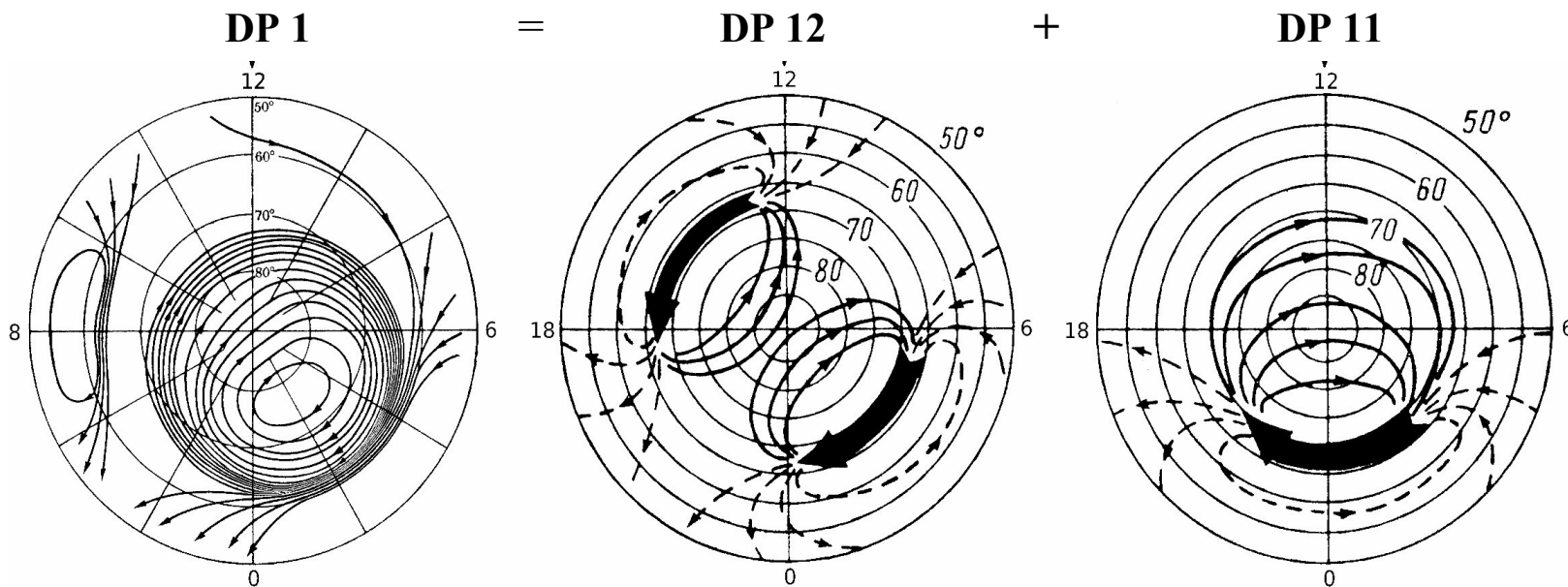
О.А. Трошичев, Н.А. Степанов
Арктический и Антарктический НИИ, С.Петербург

IV Международная конференция POLAR-2026
Санкт-Петербург, 19 мая 2026г.

Ионосферная токовая система магнитной суббури

DP1 - полярные магнитные суббури – магнитные возмущения, происходящие в авроральной зоне при интенсивном вторжении авроральных частиц [Akasofu, 1968].

Две фазы развития суббури: **DP12** - фаза роста (предварительная) и **DP11** - активная (взрывная) фаза [Troshichev et al., 1979].



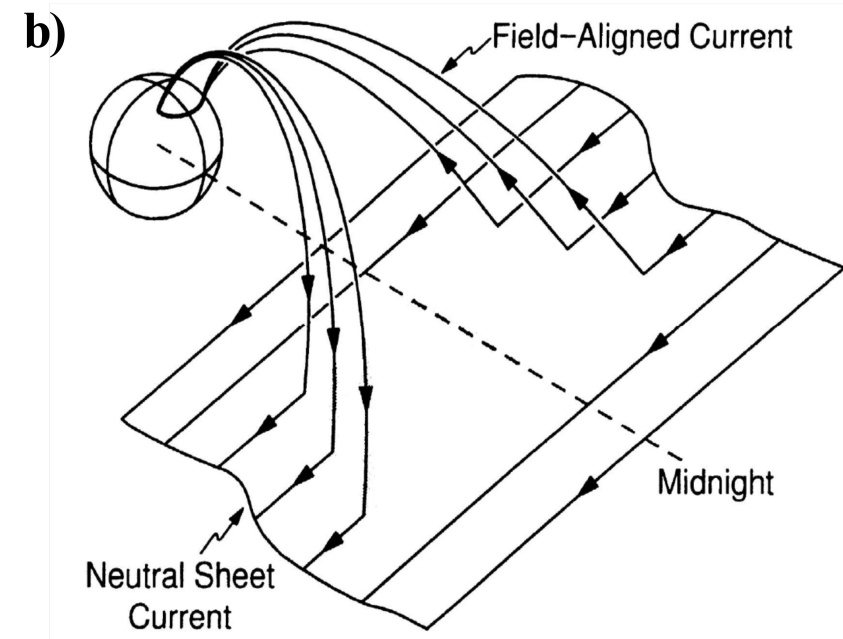
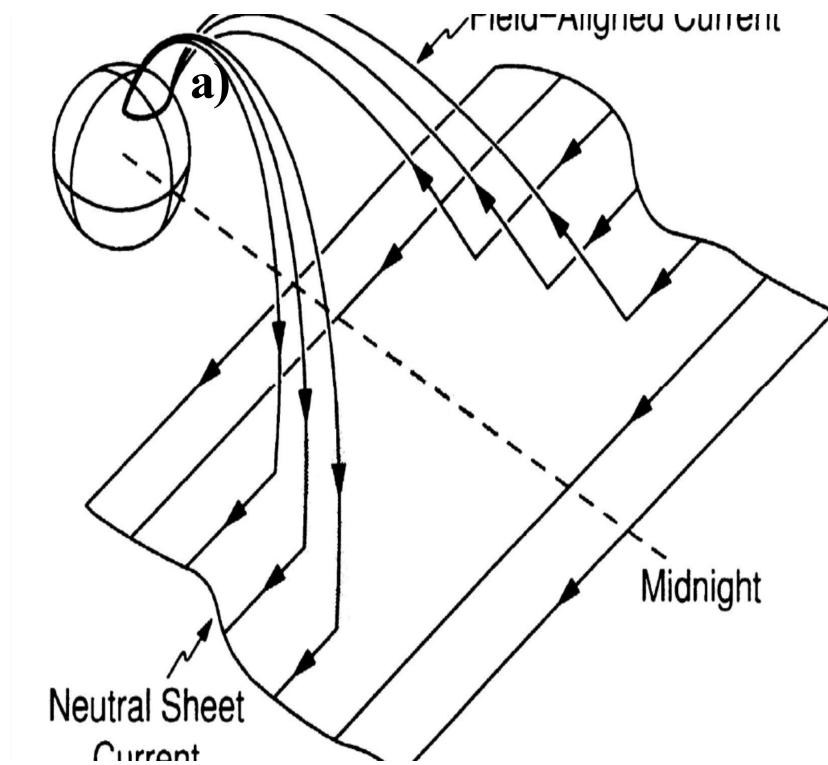
Токовая система фазы роста суббури (**DP12-возмущения**) включает **западный электроджет в утреннем секторе** авроральной зоны и **восточный электроджет в вечернем секторе**.

Основным элементом взрывной фазы суббури (**DP11-возмущения**) является **западный электроджет в ночном секторе** авроральной зоны.

Интенсивность и характер развития магнитной суббури определяется суперпозицией DP12 и DP11 токовых систем, которые различаются не только своей локализацией в пространстве и силой, но и совершенно различной динамикой поведения.

Мощность западного и восточного электроджетов оценивается по величине отрицательных и положительных магнитных возмущений в авроральной зоне (AL и AU индексы).

Системы продольных электрических токов (FAC) определяющие развитие магнитных суббурь

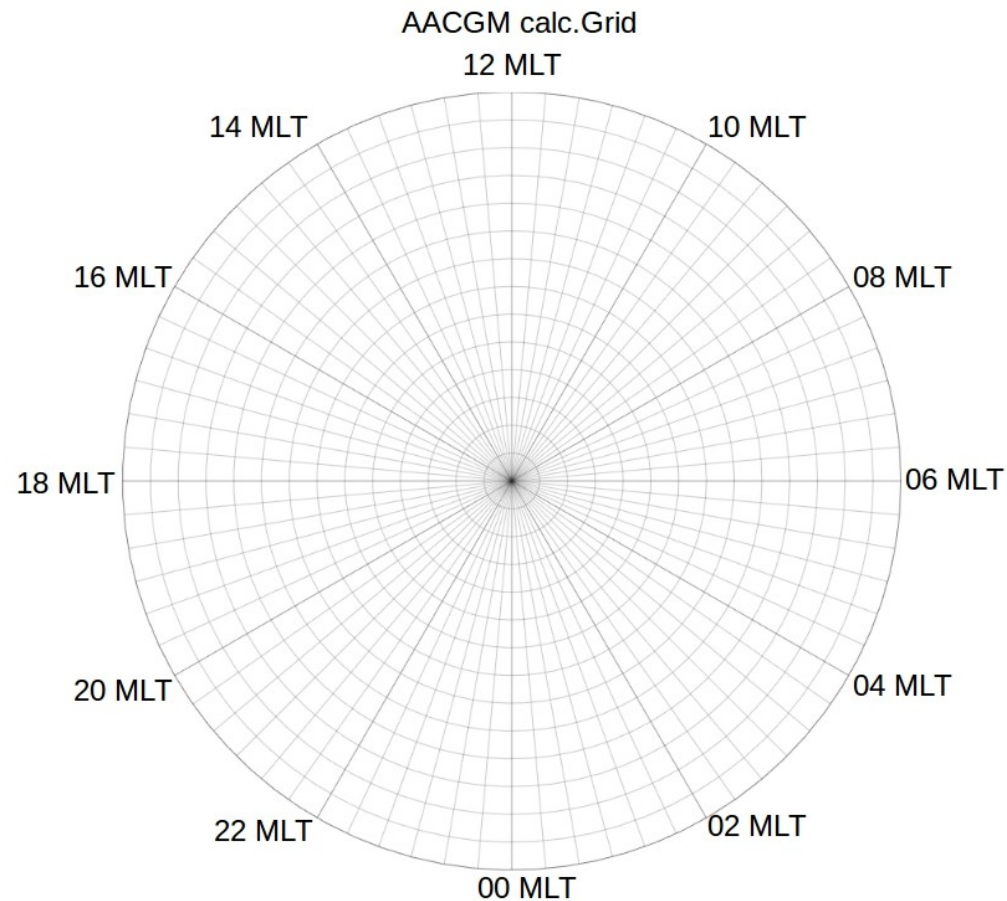


Основной системой продольных токов является система **Region 1 FAC** локализованная на приполюсной границе авроральной зоны. [Zmuda and Armstong, 1974; Langel, 1975; Iijima and Potemra, 1976 a,b, 1978], При повышении проводимости авроральной зоны на экваториальной границе авроральной зоны развивается **R2 система** с обратной полярностью продольных токов, что обуславливает развитие **DP12 возмущений** с западным и восточным электроджетом в утреннем и вечернем секторах авроральной зоны.

Взрывная фаза суббури (**DP11 возмущения** с интенсивным западным электроджетом в ночном секторе авроральной зоны) обусловлена действием системы **SCW FAC** (substorm current wedge) [McPherron et al., 1980]. Считается, что **SCW FAC** система является результатом замыкания токов нейтрального плазменного слоя хвоста магнитосферы через ночную авроральную зону при достижении критического уровня неустойчивости токов в нейтральном слое [Kamide and Baumjohann, 1993].

Развитие магнитной суббури на предварительной (DP12) и взрывной (DP11) фазах определяется различными системами продольных токов (R1/R2 и SCW), действующими во внутренней и во внешней магнитосфере.

SuperMAG индексы магнитной активности *SML* и *SMU*



SuperMag — организация, объединяющая национальные агентства и институты, которые проводят наземные магнитные измерения. SuperMag проводит расчёт индексов магнитной активности *SML* и *SMU* в единой системе координат с использованием единой методики определения уровня отсчёта (базисной линии) на всех станциях сети магнитных измерений ($N > 300$) (Gjerloev, 2009, 2012).

Индексы *SML* и *SMU* (аналоги индексов *AL* и *AU*) вычисляются по данным 95 станций, расположенных на широтах от 55° до 85° CGLat, с учётом ежедневных и годовых изменений, обусловленных вариациями ионосферной проводимости, и изменениями основного магнитного поля Земли, что **обеспечивает создание базы однородных данных о магнитных возмущениях, генерируемых системами магнитосферных и ионосферных токов.**

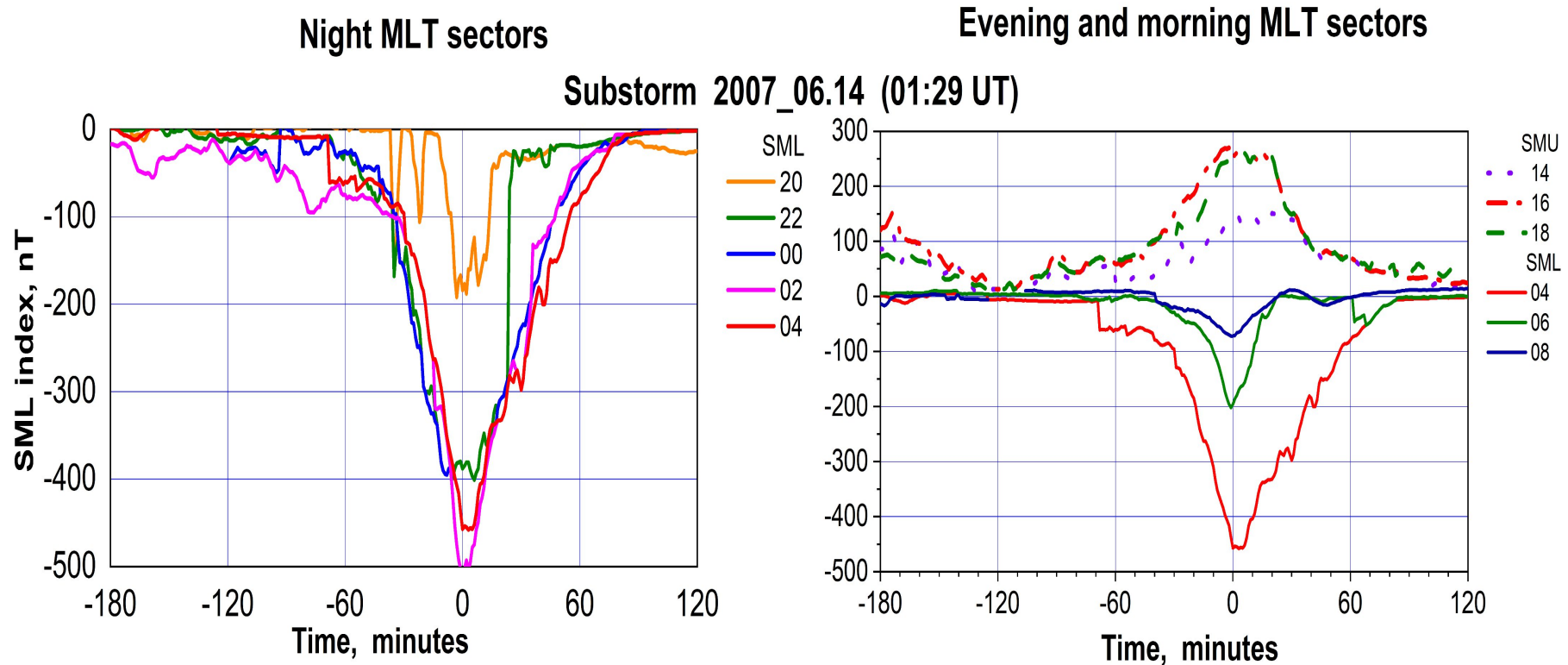
Индексы *SML* и *SMU* определяются для каждого из 12 двухчасовых MLT секторов (00-02, 02-04, ..., 22-24), как максимальное отрицательное (*SML*) или положительное (*SMU*) геомагнитное возмущение в данном секторе, которое фиксируется (с 1-мин разрешением) в каждый конкретный момент времени UT.

База данных SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu>) содержит информацию об интенсивности магнитных возмущений (индексы *SML* и *SMU*) в различных секторах MLT, что даёт возможность определить структуру SCW (локализацию и долготную протяжённость) в ходе каждой магнитной суббури.

Анализ структуры SCW был выполнен, по данным об *SML* и *SMU* индексах в ночном (20-02) и утреннем (04-08) MLT секторах в ходе 146 изолированных суббурь (с интенсивностью > 400 нТ), наблюдавшихся в 1998–2016 гг.

Структура SCW (классическое представление)

Принято считать, что продольные SCW токи втекают в авроральную ионосферу в 02-04 MLT секторе и вытекают в 20-22 MLT секторе, симметрично относительно полуночного меридиана, что обуславливает взрывное и синхронное развитие западного электроджета во всей ночной авроральной зоне. Пример суббури с симметричной структурой SCW представлен на Рис., где разным цветом показан ход разных SML и SMU индексов.



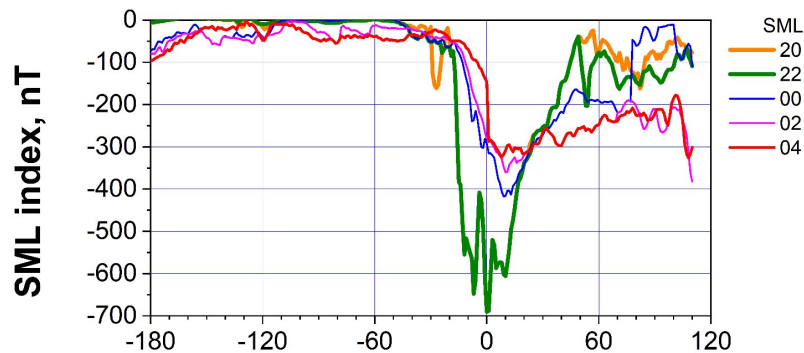
Суббури развивалась почти синхронно во всём ночном регионе (20–04 MLT) и достигла максимальной интенсивности в 01:29 UT во всех ночных секторах MLT. Согласованное поведение «ночных» SML 22, 00, 02 индексов и «утреннего» SML 04 индекса свидетельствует о сильном влиянии SCW FAC системы на систему R1/R2 FAC. В этот же момент достигли максимума возмущения в утреннем 06-08 MLT и вечернем 14-16 MLT секторах (SML \approx - 200 нТ и SMU \approx +250 нТ), что указывает на тесную связь между западным и вечерним электроджетами в утреннем и вечернем секторах, которое обеспечивается системой R1/R2 продольных токов..

Суббури с симметричной структурой SCW являются очень редким вариантом развития суббури (4 случая из 146 суббурь). Синхронный взрывной рост индексов SML происходит обычно в секторах MLT ограниченной протяженности, которые могут находиться в любой части ночного региона, тогда как в других ночных MLT секторах магнитная активность растёт очень медленно или вовсе не увеличивается.

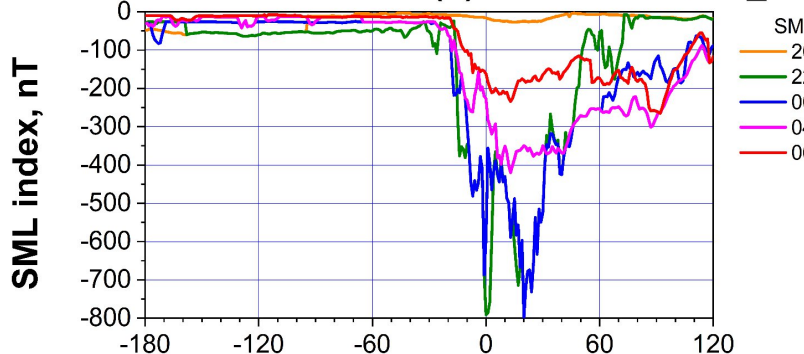
Обычная структура SCW

Night MLT sectors

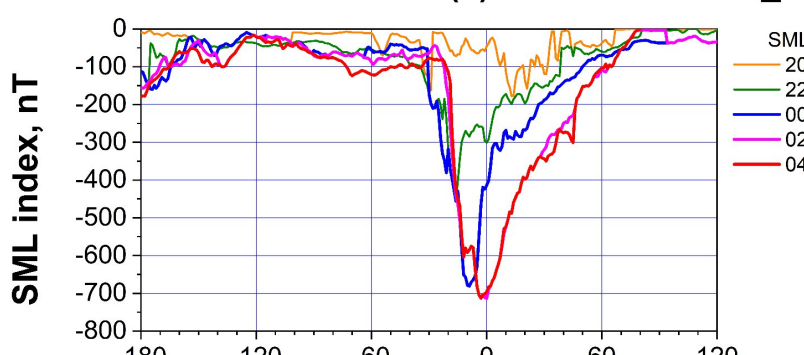
(a) Substorm 2007_05.30 (16:17 UT)



(b) Substorm 2015_11.13 (10:16 UT)

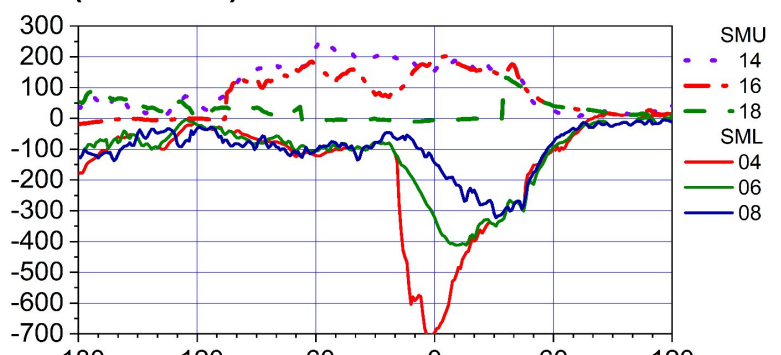
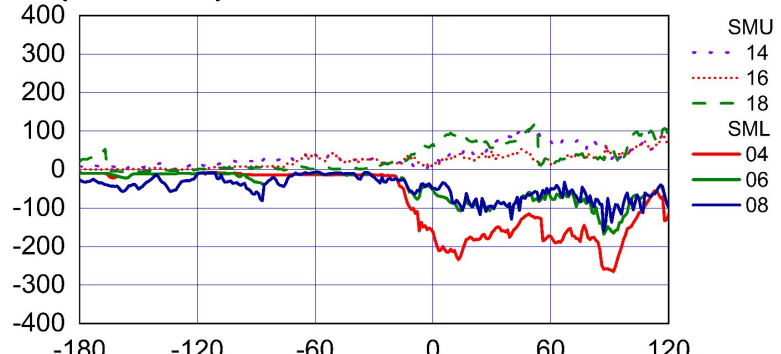
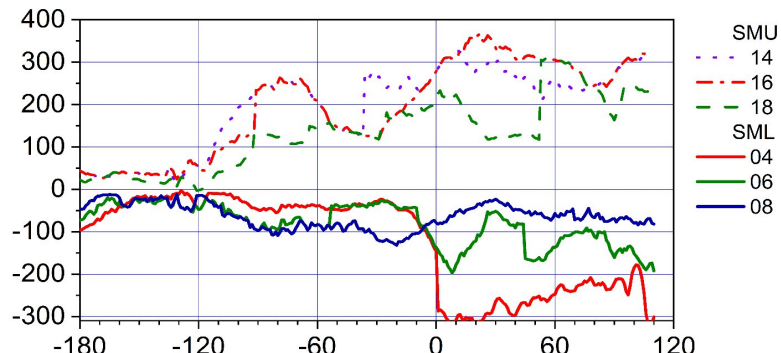


(c) Substorm 2004_04.24 (14:22 UT)



Time, minutes

Evening and morning MLT sectors



Time, minutes

Три примера обычно наблюдаемой структуры SCW.

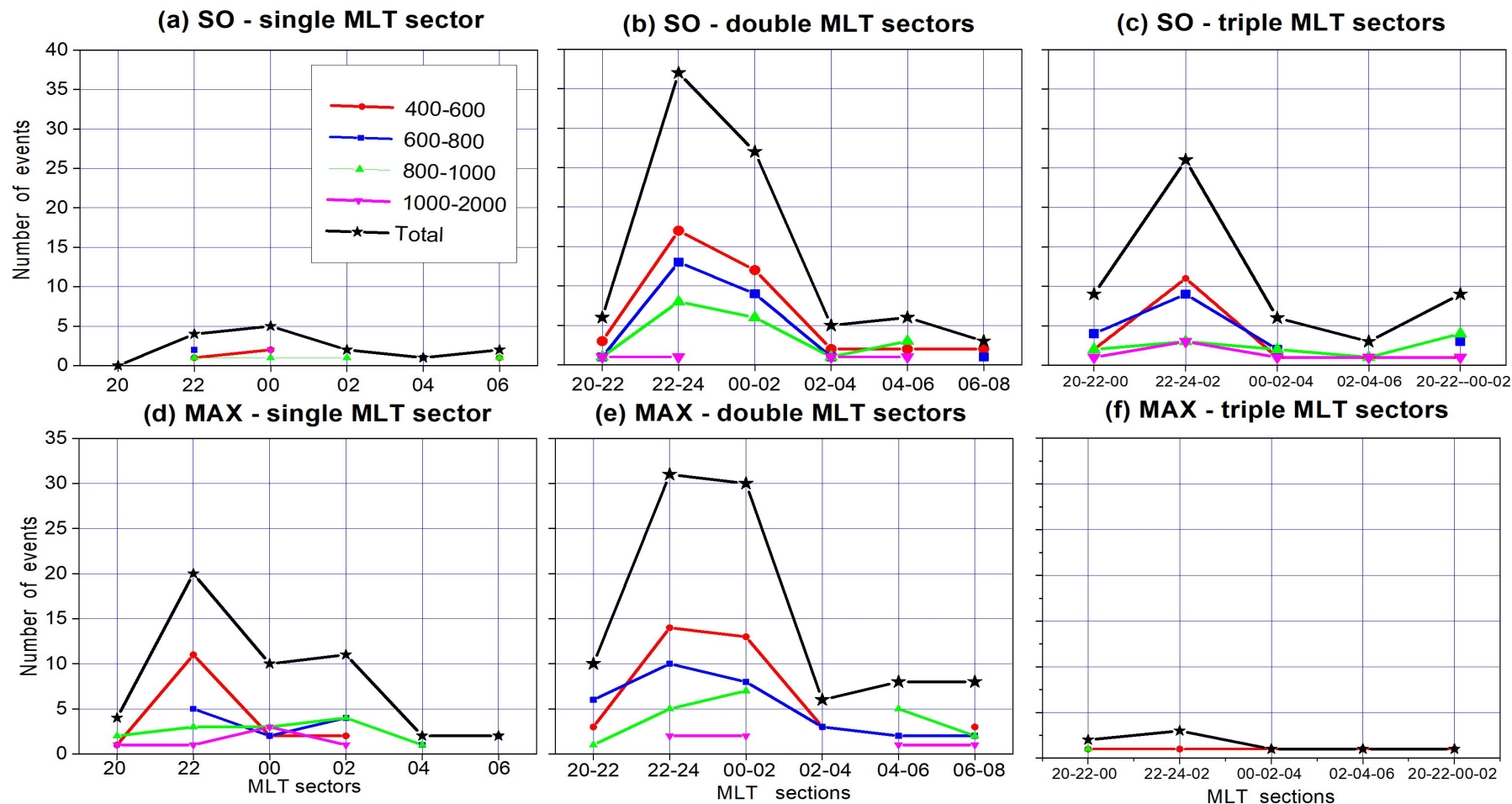
Суббури 30 мая 2014г. Синхронный и взрывной рост магнитной активности наблюдался только в секторе MLT 20-22 с двукратным увеличением индексов SML по сравнению с секторами MLT 00 и 02, где рост индексов SML происходил с задержкой.

Суббури 13 ноября 2015 г. Взрывной рост SML индексов наблюдался синхронно в секторах 22-00 MLT, но практически при отсутствии роста SML индекса в секторе 20 MLT и при слабом увеличении SML в секторе 04 MLT.

Суббури 24 апреля 2004 г. Возмущение началось как взрывной и синхронный рост SML индексов в секторах 22-00 MLT, однако через 10 минут сектор 22 MLT отключился, и начался рост SML индексов в секторах 02-04 MLT. В течение следующих 10 минут индекс SML 00 достиг максимума, после чего магнитные возмущения в этом секторе уменьшились вдвое, при этом SML индексы в секторах MLT 02-04 продолжали расти и в 14:22 UT показали максимальную для суббури величину SML=714 нТ.

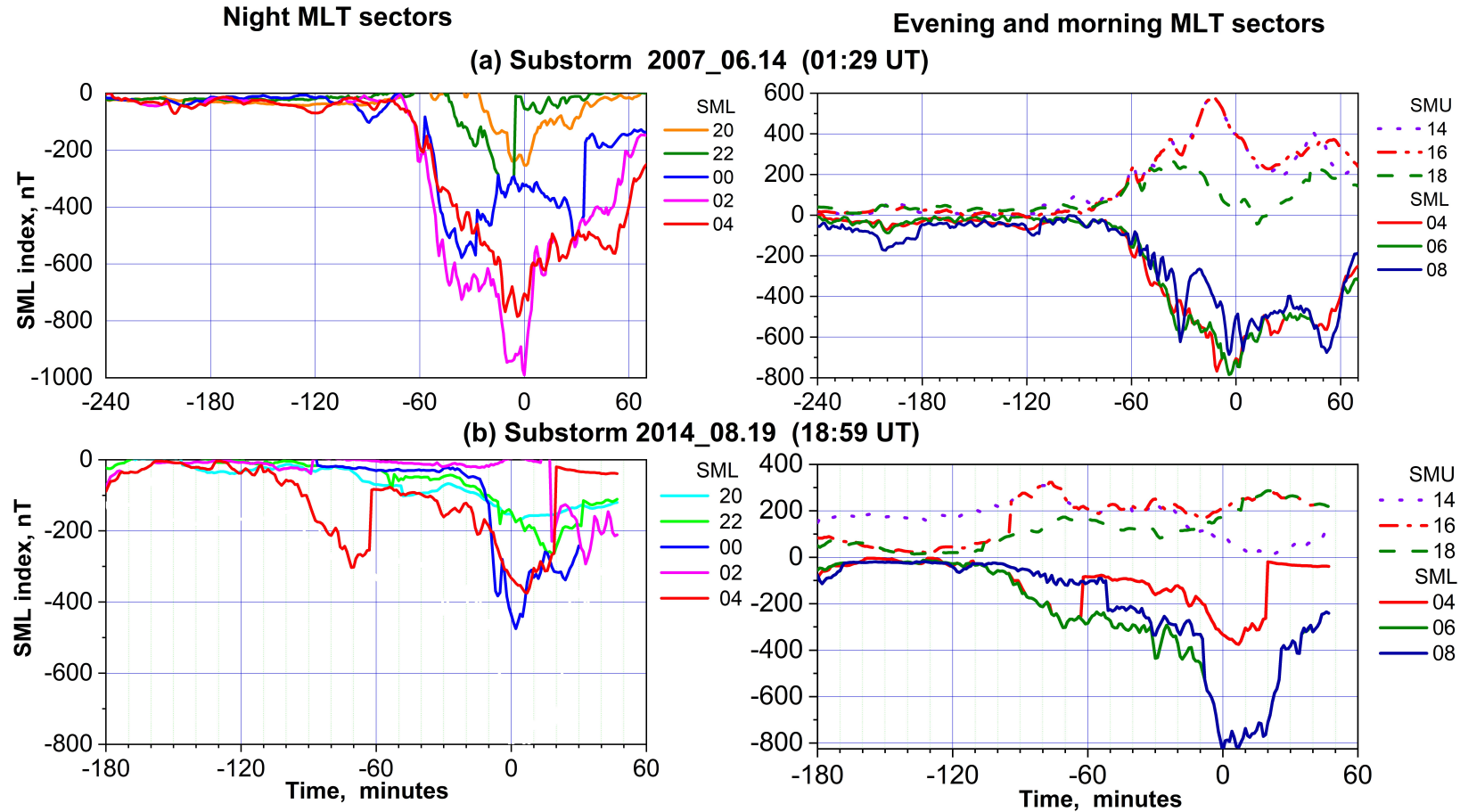
Индексы SML в утренних секторах MLT 04, 06, 08 практически не росли ($|SML| < 100$ нТ) вплоть до момента максимума суббури после чего магнитуда индекса SML 04 увеличилась в несколько раз. В то же время индексы SMU 14, 16 в вечернем секторе варьировали случайным образом, в некотором соответствии с изменениями индекса SML 04. Чтобы выявить наличие трендов в изменениях структуры SCW, суббури были разделены на группы в зависимости от от местоположения и протяжённости MLT секторов с максимальными значениями SML индексов

Расположение и протяжённость зон максимума магнитной возмущённости



- Суббури были разделены на разные группы в зависимости протяжённости MLT зоны, где фиксировались максимальные значения SML на стадии внезапного начала суббури (SO) (верхний ряд) и на стадии максимума суббури (MAX) (нижний ряд). Рассматривались 3 категории протяжённости: один MLT сектор, два MLT сектора и три (или более) сектора. Результаты анализа показывают, что структура SCW, практически всегда различна на стадиях SO и MAX одной и той же суббури и может существенно изменяться от одной суббури к другой. Для SO стадии суббури характерна большая долготная протяжённость SCW сигнатуры: в 30% случаев протяжённость SCW зоны достигает трёх и более MLT секторов, в 60% случаев двух MLT секторов. Напротив, на MAX стадии суббури сигнатуры SCW обычно ограничены зонами с протяжённостью от одного до двух MLT секторов.

Смещение зон максимума SML в утренний MLT 04-08 сектор

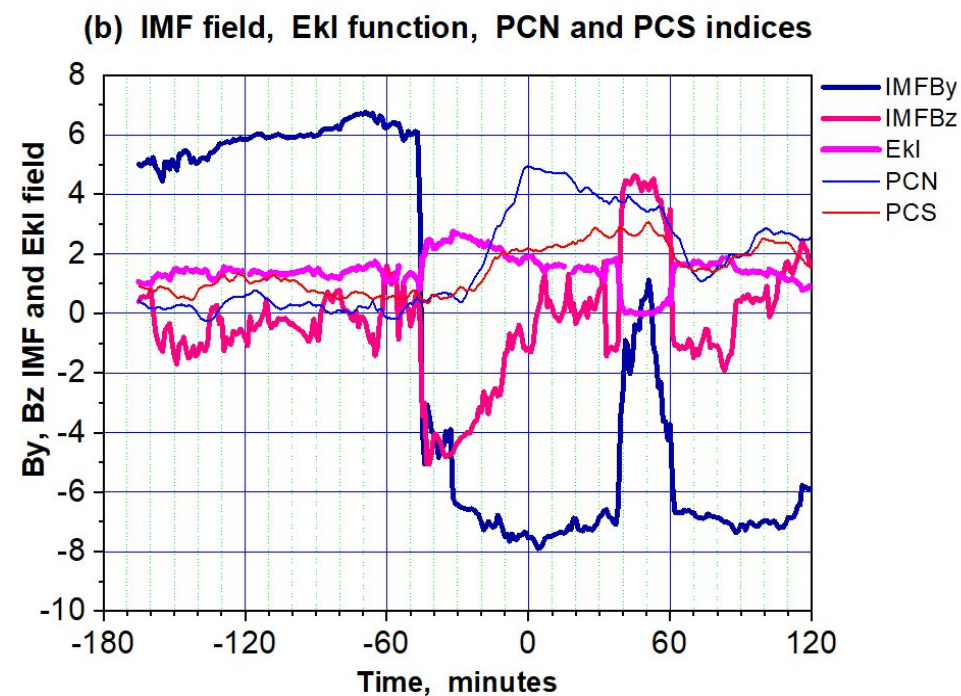
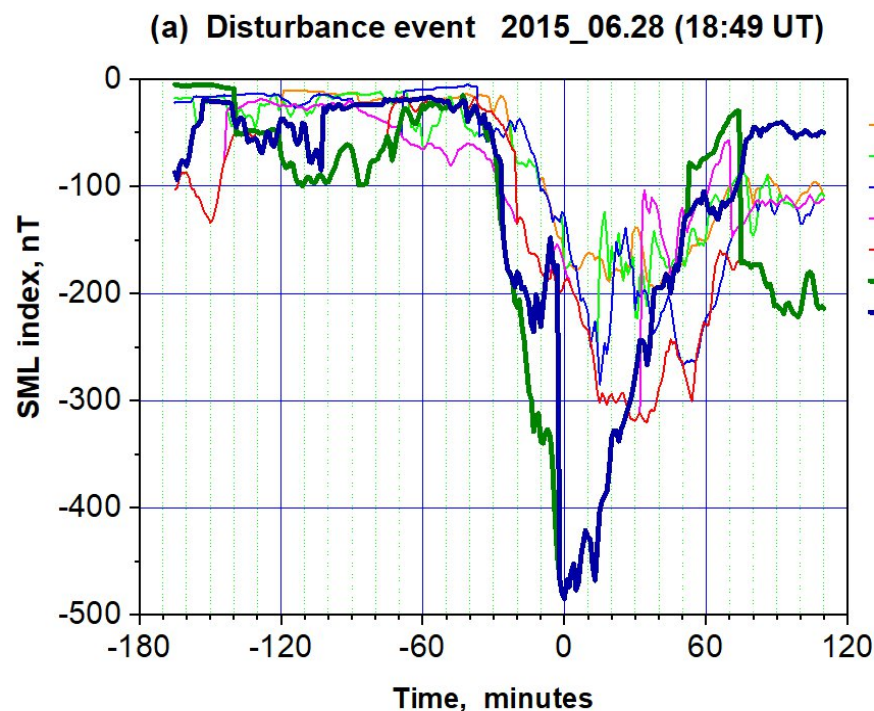


На начальной (SO) стадии суббури сигнатуры SCW фиксируются и в пред-полуночном и в после-полуночном секторах авроральной зоны с примерно одинаковой частотой, тогда как для MAX стадии суббури характерно смещение максимальных значений SML в утреннюю сторону.

Показаны суббури, в которых **координированный рост индексов SML в секторах MLT 04-06 происходил в момент максимума суббури (14 июня 2007 г) или после максимума (15 мая 2016 г).** В обоих случаях **рост индексов SML в утреннем секторе сопровождался соответствующим ростом индексов SMU в вечернем секторе, что говорит о том, что оба явления обусловлены действием R1/R2 FAC системы.** Этот вывод согласуется с результатами [Oliveira and Zesta, 2024], которые свидетельствуют о постоянном усилении потока Пойнтинга и электронных высыпаний на утренней стороне в связи с усилением западного электроджета в утреннем секторе авроральной зоны.

Результаты анализа также показывают, что **смещение максимальных величин SML индексов в утренний сектор (04, 06 MLT) происходит в тех случаях, когда максимальные величины SML на SO стадии наблюдались в после-полуночные часы, вне зависимости от типа SCW сигнатуры.**

Максимумы SML не связанные с SCW



В некоторых случаях большие значения SML индексов фиксировались в утреннем секторе MLT даже при отсутствии каких либо признаков суббури в ночном секторе (событие 28 июня 2016 г.) Представлены вариации B_Z и B_Y компонент ММП в этот период, и соответствующие изменения поля $E_{KL}=V_{sw}*(B_Y^2+B_Z^2)^{1/2}\sin^2\theta/2$ (Kan и Lee, 1979).

Изменения SML индексов в утреннем секторе (06-08 MLT) были тесно связаны с вариациями B_Z и B_Y компонент ММП: **индексы SML 06 и 08 начали расти, когда полярность B_Y компоненты ММП резко изменилась с положительной на отрицательную, а отрицательная B_Z компоненты ММП начала резко уменьшаться. Максимальная величина индексов SML 06-08 (- 485нТ) была зафиксирована (момент $T=0$) при отрицательном значении компоненты $B_Y=-8нТ$ и нулевом значении B_Z компоненты ММП.**

Интенсивность магнитных возмущений в ночном секторе 22-02 MLT оставалась менее -200 нТ вплоть до момента $T=0$, тогда как магнитная активность в вечернем секторе вовсе отсутствовала.

Учитывая, что величины SML и SMU индексов определяются по данным наблюдений в поясе широт от 55° до 85° CGLat., делается вывод, что высокие значения утренних SML индексов были получены из данных наблюдений на широтах выше авроральной зоны и, следовательно, относятся к процессам, происходящим в полярной шапке при воздействии B_Y и положительной B_Z компонент ММП, а не к эффекту SCW.

Выводы

Структура системы продольных токов «токовый клин суббури» (SCW), которые обуславливают генерацию западного электроджета в ночной авроральной зоне в ходе магнитной суббури, была исследована с использованием индексов SML и SMU, характеризующих интенсивность магнитных отрицательных и положительных возмущений в каждом из двух-часовых секторов MLT в высоких широтах. Были получены следующие результаты :

- (1) Структура (местоположение и долготная протяжённость) SCW на стадиях внезапного начала (SO) и максимума (MAX) одной и той же суббури практически всегда различна и может существенно изменяться от одной суббури к другой.
- (2) Для SO стадии суббури сигнатура SCW фиксируется в зонах с долготной протяжённостью в два, три и более MLT секторов. Напротив, на MAX стадии суббури сигнатура SCW обычно ограничена зоной с протяжённостью от одного до двух MLT секторов.
- (3) Сигнатуры SCW фиксируются как в пред-полуночном, так и в после-полуночном секторах авроральной зоны с примерно одинаковой частотой, для стадии максимума суббури характерно смещение максимальных значений SML в утреннюю сторону.
- (4) Таким образом, замыкание токов нейтрального слоя через ночную ионосферу, обуславливающее генерацию SCW FAC системы, происходит, вопреки существующим представлениям, не по всей ширине нейтрального слоя, а в рамках ограниченных зон, примыкающих к полуночному меридиану или смещённых относительно меридиана в утреннюю или вечернюю сторону.
- (5) Величина индексов SML, регистрируемых в утреннем секторе MLT, может контролироваться различными физическими процессами (во время взрывной фазы суббури магнитная активность в утреннем сегменте 04-08 MLT) обычно является суперпозицией DP11 и DP12 возмущений), однако этот важный аспект не учитывается при оценке величины максимальной величины SML индекса в базе данных SuperMAG.
- (6) Для обеспечения постоянной информации о структуре суббурового токового клина и, следовательно, о процессах, происходящих в нейтральном слое хвоста магнитосферы, предлагается ввести в практику новый *SCW-индекс*, определяемый по величине SML в ночных (20–02) секторах MLT в поясе геомагнитных широт от 60° до 76° CGLat.