МАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ В ПОЛЯРНЫХ ШАПКАХ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ДВУХ МЕХАНИЗМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА МАГНИТОСФЕРУ

О.А. Трошичев

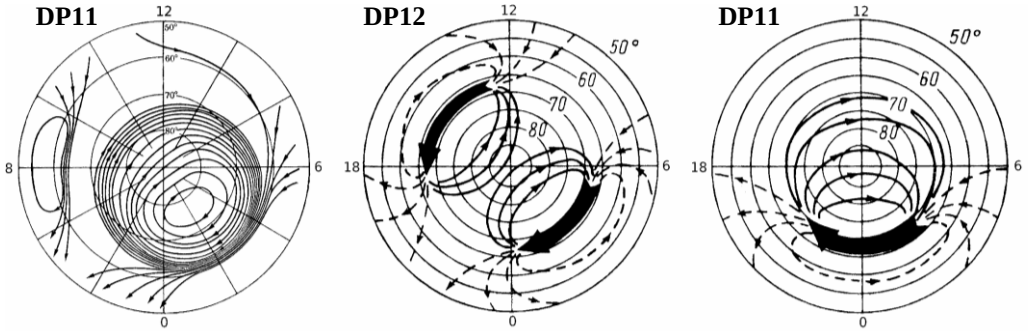
1. Арктический и Антарктический НИИ, С.Петербург

olegtro@aari.ru

Симпозиум «**Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и событий**» («**ПРОГНОЗ-2023**»), ИЗМИРАН

Полярные магнитные возмущения

Магнитные суббури

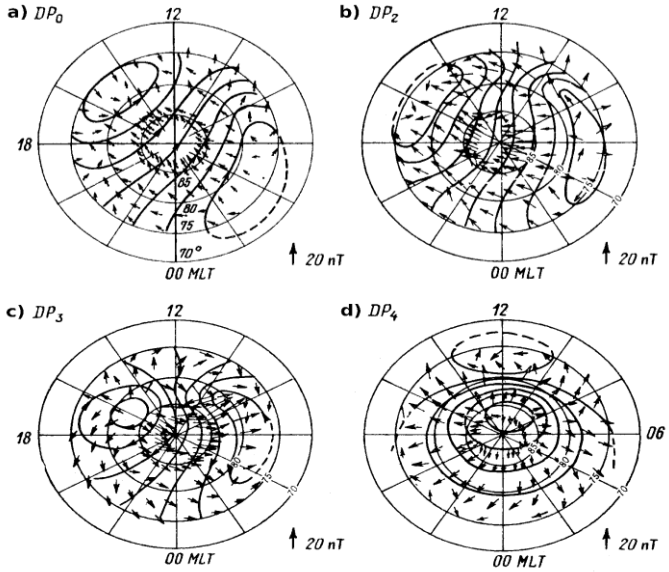


Показаны “эквивалентные токовые системы” – системы ионосферных токов, обеспечивающие реальное (наблюдаемое на магнитных станциях) распределение и интенсивность магнитных возмущений.

DP1 – токовая система магнитной суббури [Akasofu 1968]

DP12 и DP11 – токовые системы возмущений в полярной шапке на фазе роста и взрывной фазе суббури [Troshichev et al. 1974].

Полярные магнитные возмущения



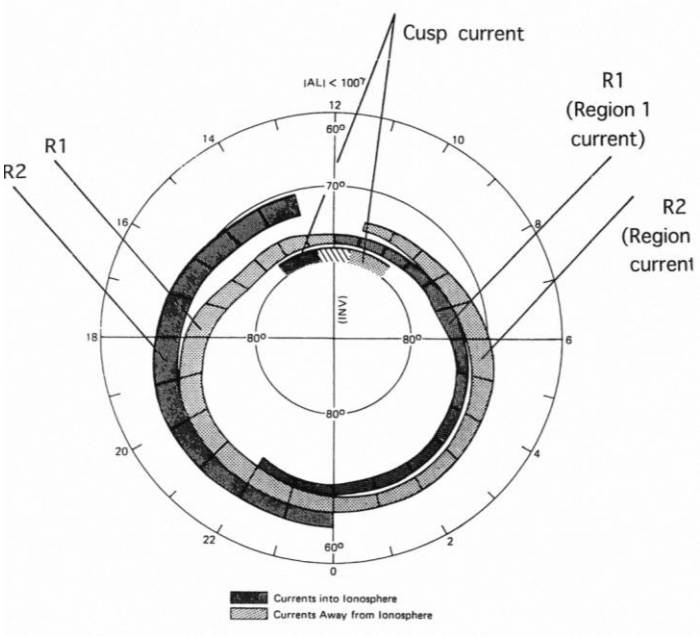
DP2 - возмущения в полярной шапке, наблюдающиеся при воздействии южной $\mathbf{B_{ZS}}$ компоненты ММП [Obayashi, 1967; Nishida, 1968; Nishida & Maezawa, 1971; Troshichev, 1975].

DP0 - возмущения, коррелирующие со скоростью солнечного ветра [*Sergeev & Kuznetsov, 1981*]

DP3 возмущения в околополюсной области, обусловленные северной B_{ZN} компонентой ММП. [Maezawa, 1976; Kuznetsov & Troshichev, 1977].

DP4 возмущения в области дневного каспа, обусловленные азимутальной B_Y компонентой ММП [Svalgaard, 1968; Mansurov, 1969; Friis-Christensen, 1972; Sumaruk & Feldstein, 1973].

Системы продольных магнитосферных токов (FAC systems)



R1 FAC система включает продольные токи, втекающие в ионосферу на утренней стороне и вытекающие из ионосферы на вечерней стороне аврорального овала [*Zmuda and Armstrong*, 1974; *Langel*, 1975; *Iijima and Potemra*, 1976a,b, 1982; *Bythrow and Potemra*, 1983]. Это основная FAC система, которая действует непрерывно в любой сезон года и при любой полярности ММП, при этом интенсивность токов возрастает летом и при южной компоненте ММП..

R2 FAC – система противоположно направленных токов, действующая на экваториальной границе аврорального овала в условиях повышенной проводимости авроральной ионосферы (на фазе роста суббури) **.**

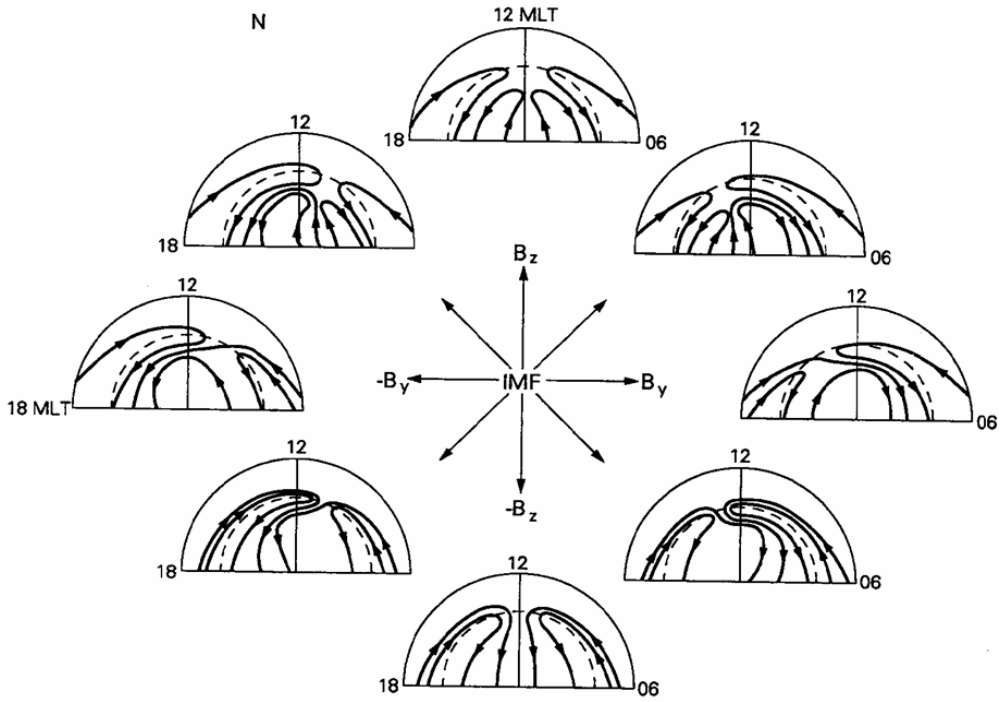
Биркеландовские токи (Birkeland current wedge) – продольные токи в ночном секторе авроральной зоны, ответственные за взрывную фазу суббури, обусловлены процессами в хвосте магнитосферы во время взрывной фазы.

BZN FAC токи наблюдаются при воздействии северной $\boldsymbol{B_{ZN}}$ компоненты ММП в околополюсной области в летней полярной шапке [*McDiarmid et al.*, 1978, 1979; *Zanetti et al., 1984*]**.** Полярность **BZN** токов противоположна полярности **R1 FAC токов.**

BY FAC токи наблюдаются при воздействии азимутальной $\boldsymbol{B_Y}$ компоненты ММП премщественно в летней полярной шапке в области к полюсу от дневного каспа [*Wilhjelm et al.*, 1978; *McDiarmid et al.*, 1978, 1979; *Iijima et al.*, 1978; *Saflekos and Potemra*, 1980]. Полярность BY продольных токов противоположна в северном и южном полушариях и определяется знаком $\boldsymbol{B_Y}$ компоненты ММП.

Продольные токи и полярные магнитные возмущения

Системы конвекции, характеризующие структуру электрических токов в хорошо проводящей летней ионосфере [*Troshichev,1984*]



Магнитные возмущения, наблюдаемые в полярных шапках, генерируются соответствующими системами продольных токов, действующими в магнитосфере [Gizler et al., 1979; Troshichev et al., 1979]

Постоянно действующая **R1 FAC система** генерирует независимо от сезона и ориентации ММП возмущения **DP2/DP0** типа.

NBZ FAC система, действующая только при северном ММП, генерирует **DP3** возмущения. В результате действия действии **R1** и **NBZ FAC** систем в полрной шапке формируется 4-х вихревая токовая система **DP2+DP3**.

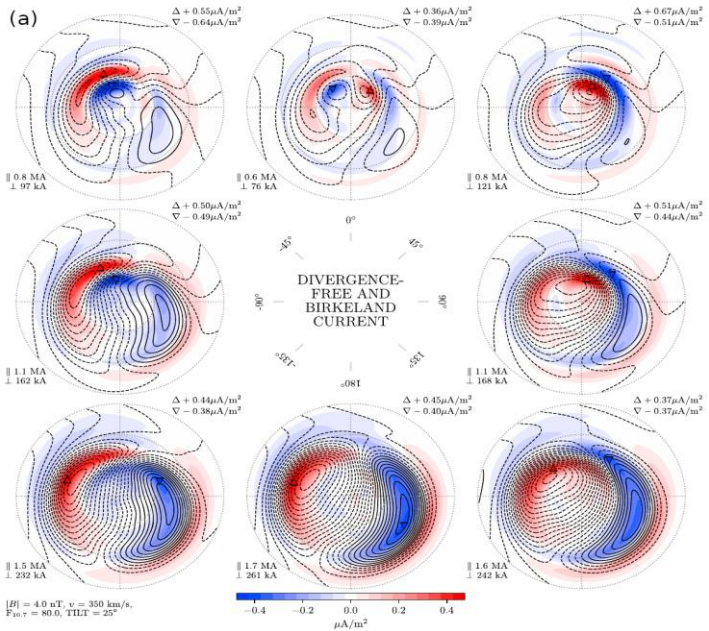
BY FAC система генерирует возмущения DP4 в области дневного каспа, которые очень сильно искажают структуру DP2 и DP4 возмущений.

Тесная связь ионосферных токовых систем с соответствующими системами продольных токов была подтверждена по данным наблюдений на спутниках Dynamics Explorer 2 [Weimer 2001[, Iridium constellation [Anderson et al. 2008; Green et al. 2009], CHAMP and Swarm [Laundal et al. 2018].

Распределение продольных и соответствующих ионосферных (холловских) токов, рассчитанных по модели AMPS [Laundal et al., 2018]

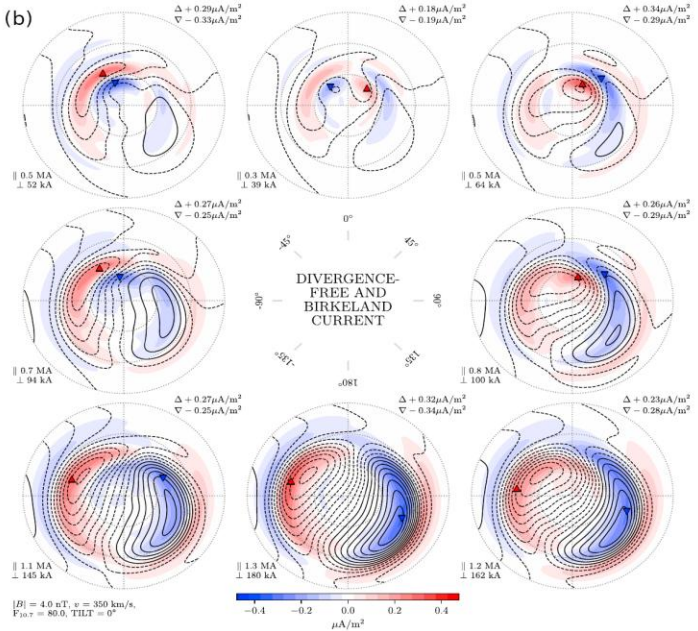
Летний сезон

By<0 **By=0** **By>0**



Зимний сезон

By<0 **By=0** **By>0**



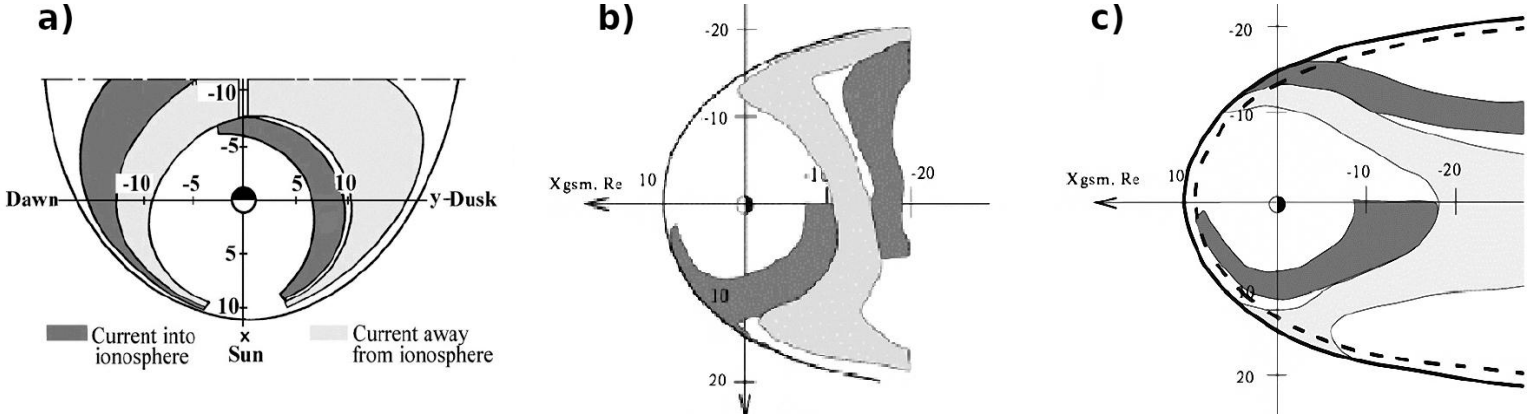
Распределение ионосферных токов (чёрные контуры) и продольных токов (текущие вверх - красный цвет, текущие вниз – синий цвет) представлено для различных ориентаций ММП (в центре)

R1 токи всегда втекают в ионосферу в утреннем секторе границе аврорального овала и вытекают из ионосферы в вечернем секторе, вне зависимости от сезона и полярности ММП.
Формирование NBZ FAC системы при северном B_Z ММП генерирует в ионосфере вторую токовую систему.
Формирование BY FAC ведёт к усилению ионосферных токов в утреннем или вечернем секторе аврорального овала, в зависимости от знака BY компоненты ММП.

Механизм генерации продольных токов R1/R2

R1 и **R2 FAC** системы локализованы на приполюсной и экваториальной границах авроральных овала [*Zmuda & Armstrong, 1974*; *Iijima & Potemra, 1976*; *Ohtani, 1995*; *Chan & Russel, 2000*],

Проецирование **R1/R2** токов в экваториальную плоскость магнитосферы, было выполнено в работах [*Potemra, 1978*] с использованием модели магнитосферы [*Fairfield and Mead, 1975*] (**a**) и [*Antonova et al., 2006*] с использованием «короткой» (**b**) и «длинной» (**c**) моделей магнитосферы [*Tsyganenko*, 1996, 2002]. **R1/R2** токи связаны с плазменным слоем магнитосферы, который окружает Землю на расстояниях ~ (7 – 10) R_E [*Antonova et al. 2013, 2014, 2018*].



Согласно результатам модельных симуляций [*Yang et al. 1994*; *Yamamoto et al. 1996*], продольные токи **R1/R2** связаны с областью градиентов давления магнитосферной плазмы. Анализ соотношений между плазменными градиентами и продольными токами [*Iijima et al, 1997; Wing and Newell 2000; Xing et al. 2009*] подтвердил этот вывод. Следует отметить, что механизм генерации продольных токов при формировании градиентов плазменного давления в магнитосфере, был рассмотрен в работах [*Тверской, 1972; Antonova and Tverskoy 1998; Antonova 2002*].

Таким образом, результаты всех экспериментальных и теоретических анализов свидетельствуют о том, что генерация продольных **R1/R2** токов обусловлена постоянным образованием, под действием солнечного ветра, градиентов плазменного давления в магнитосфере.

Механизм генерации продольных токов BY и NBZ

DP3 и DP4 возмущения, генерируемые BY FAC и NBZ FAC системами, наблюдаются соответственно, в области дневного каспа (при воздействии азимутальной B_Y компоненты ММП) и в области к полюсу от каспа (при воздействии северной B_{ZN} компоненты). Эти области связаны с пограничными слоями магнитосферы [*Newell and Meng, 1992; Wing et al., 2010*]. Следовательно, механизм генерация BY FAC и NBZ FAC систем должен определяться процессами, происходящими в погранслое магнитосферы.

Согласно «концепции пересоединения» [*Dungey, 1961*], межпланетное магнитное поле воздействует на геомагнитное поле в тех пограничных областях магнитосферы, где (и когда) эти поля имеют противоположную направленность, результате чего является пересоединение этих полей в зоне их контакта.

При воздействии северного ММП процесс пересоединения будет происходить там, где геомагнитное поле направлено к югу, т.е. в пограничном сдое магнитосферы к полюсу от каспа. При действии азимутальной компоненты ММП пересоединение должно происходить на утренней или вечерней границах магнитосферы, в зависимости от полярности B_Y компоненты ММП.

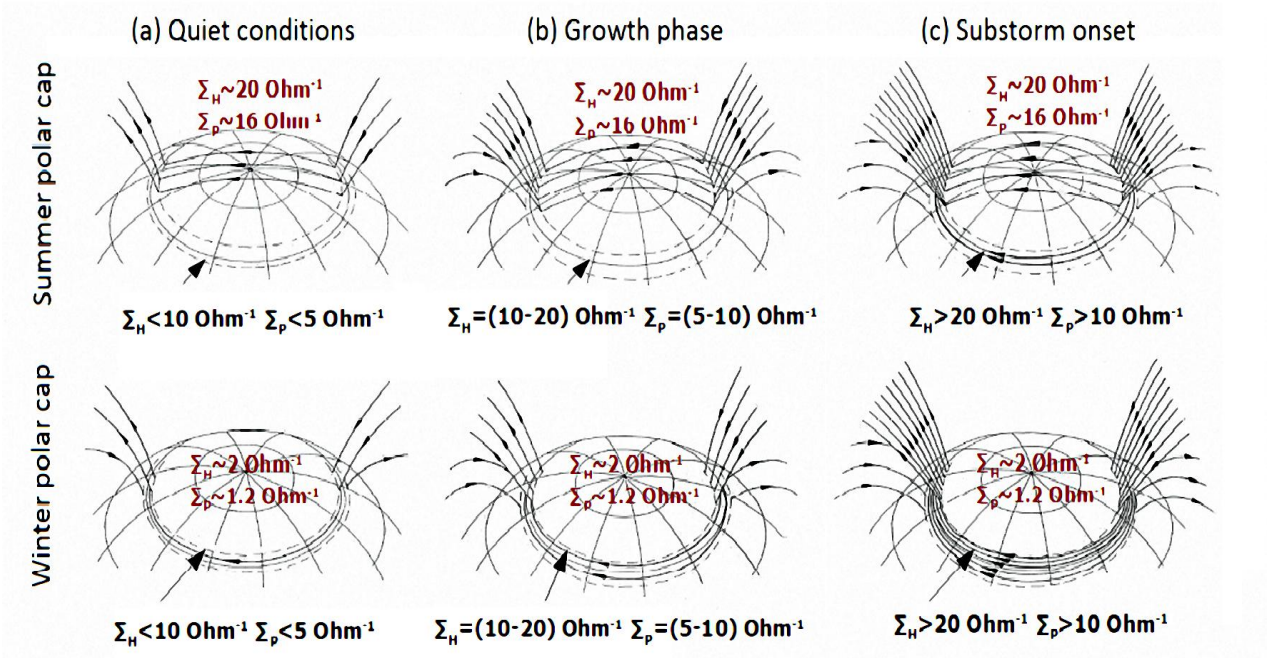
Поскольку NBZ и BY FAC системы действуют в полярных шапках, втекающие и вытекающие токи в этих системах могут замыкаться только через ионосферу полярных шапок, что предопределяет критическую зависимость NBZ и BY продольных токов от проводимости полярной ионосферы. Действительно, DP3 и DP4 возмущения, генерируемые NBZ и BY FAC системами, достигают максимума в летней сезон и пренебрежимо малы зимой.

Как следствие**, при воздействии северной и азимутальной ММП компонент, в летней полярной шапке действуют одновременно три независимых FAC системы (R1, BYи NBZ), генерирующие три вида полярных магнитных возмущений (DP2, DP3, DP4), тогда как в зимней полярной шапке действует только одна R1 FAC система и наблюдаются только DP2 возмущения.**

Этот экспериментальный факт, наглядно демонстрирующий различную природу R1 FAC и BY, NBZ FAC систем, указывает что влияние DP3 и DP4 возмущений на регулярные DP2 возмущения будет значимым только в летней полярной шапке.

R1 продольные токи и проводимость полярной ионосферы

Структура R1 продольных токов в летней и зимней полярных шапках



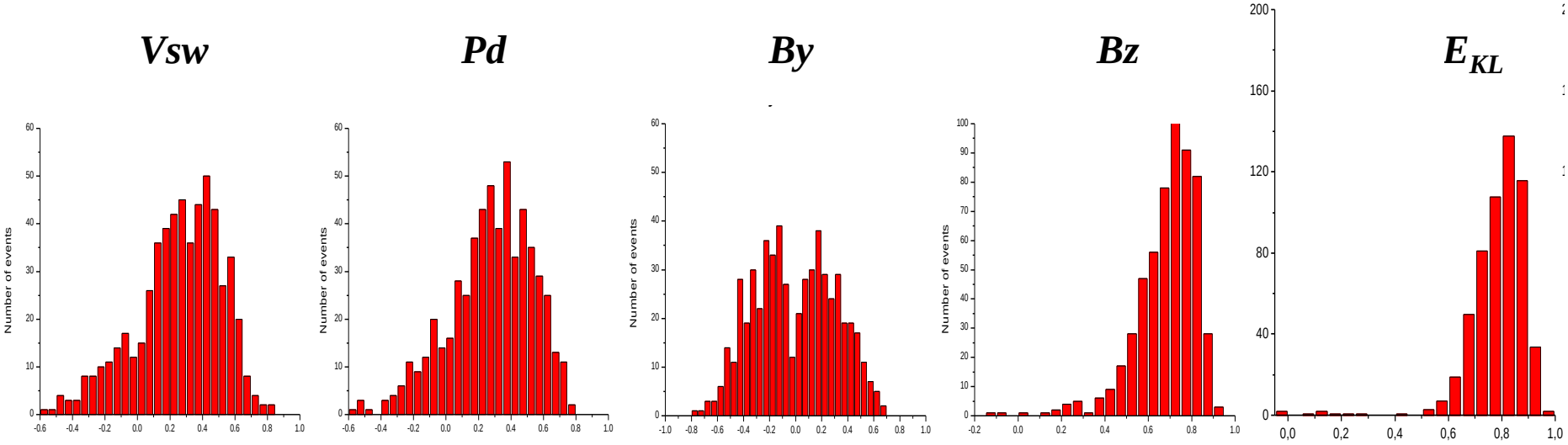
Спокойные условия. Низкая проводимость ионосферы в зимней полярной шапке (Σн = 2 Ohm^{-1}, Σр = 1.2 Ohm^{-1}**)** [*Kamide and Baumjohann 1993*]. R1 через авроральную зону, где фоновое авроральное высыпание обеспечивает достаточно высокую проводимость (Σн ~ 10 Ohm-1, Σр ~7 Ohm-1**)** [*Wallis and Budzinski 1981*].

Фаза роста суббури. Проводимость авроральной ионосферы увеличивается до значений (Σн ~ 20 Ohm^{-1}, Σр ~ 10 Ohm^{-1}**), и**нтенсивность R1 токов растёт в соответствии с проводимостью.

Активная фаза суббури. Вследствие взрывного роста авроральных высыпаний проводимость ионосферы в ночном секторе аврорального овала достигает значений (Σн ~ 40 Ohm^{-1}, Σр ~ 20 Ohm^{-1}**)**,

Концепция PC индекса (Troshichev and Andrezen, 1985)

Учитывая зависимость токовых систем DP2 и DP12 от южной ММП компоненты и сходство в их диспозиции, было предположено, что интенсивность DP2 возмущений может служить показателем возможности развития магнитных суббурь [*Troshichev et al., 1979a*]. Как показал анализ [*Troshichev and Andrezen, 1985*] DP2 возмущения хорошо коррелируют со всеми параметрами солнечного ветра и разными “coupling functions”, но наилучшая корреляция (R>0.82) наблюдается при использовании такой функции, определяемой по формуле [*Kan and Lee, 1979*], как «электрическое поле солнечного ветра» $\boldsymbol{Ekl=Vsw(B_Z^2+B_Y^2)^{1/2}\sin^2(\theta/2)}$.

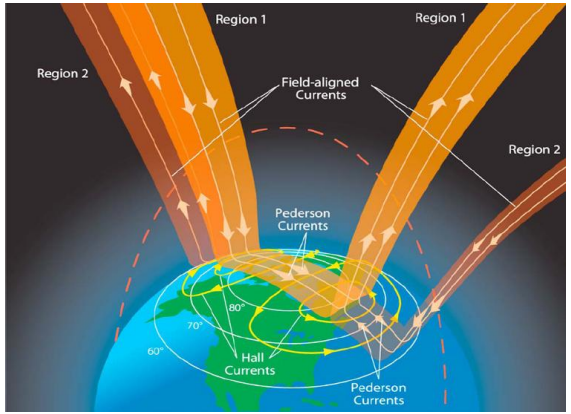


Корреляция Корреляция Корреляция Корреляция Корреляция

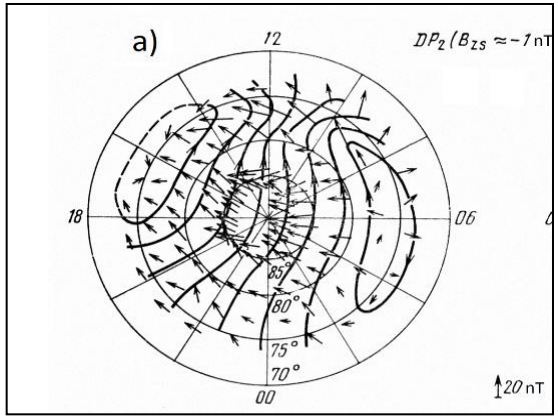
«Поле E_{KL}» не является реальным параметром солнечного ветра и представляет лишь оптимальную комбинацию («coupling function») всех геоэффективных параметров солнечного ветра (Vsw, BY and BZ компоненты ММП с учётом угла θ), которая характеризует общее воздействие солнечного ветра на магнитосферу.

Концепция PC индекса (Troshichev and Andrezen, 1985)

Система продольных токов R1, генерируемая «электрическим» полем солнечного ветра E_{KL}



Токовая система DP2 возмущений создаваемых системой R1 продольных токов.



Индекс магнитной активности в полярной шапке (PC) был введён как характеристика магнитных DP2 возмущений, коррелирующих с функцией E_{KL} [*Troshichev and Andrezen, 1985; Troshichev et al., 1988*]. Интенсивность DP2 возмущений оценивалась по величине вектора магнитного возмущения δF в околополюсной области, где DP2 токи направлены на Солнце. Соотношения между величиной вектора δF и электрическим полем E_{KL} определялись с использованием «унифицированного метода получения PC индекса» [*Troshichev et al., 2006*], который обеспечил решение двух проблем:

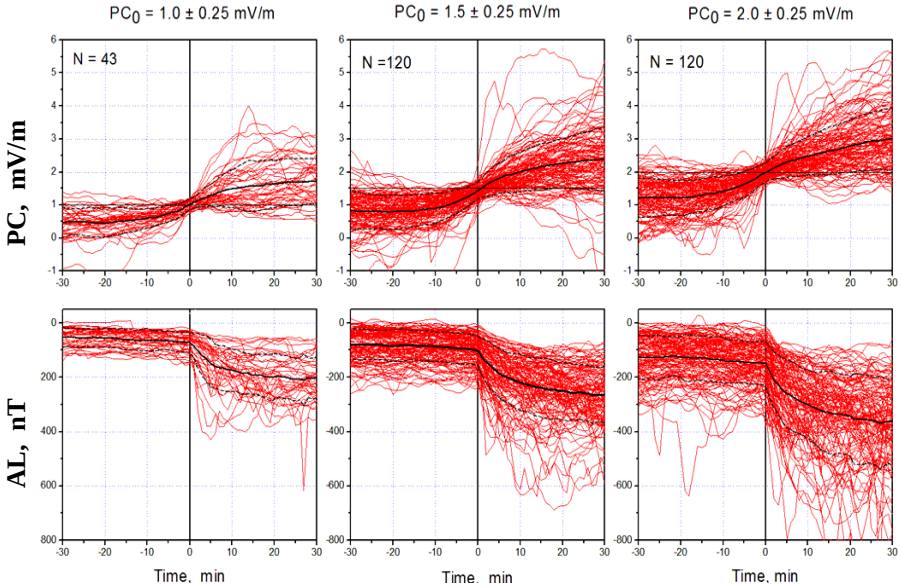
1) Определение кривой спокойного дня (QDC) с учётом суточных и сезонных изменений ионосферной проводимости, обусловленных регулярными и нерегулярными вариациями солнечного УФ излучения. QDC использовалась в качестве уровня отсчета величины магнитных возмущений δF, что позволяло рассматривать эти возмущения, как результат воздействия «электрического поля E_{KL}».

(2) Точную, т.е. статистически обоснованную оценку параметров α (наклон), β (пересечение) и угол φ, характеризующих линейную связь между величинами *EKL* и δF на станциях Туле и Восток для любого момента каждого дня всего года.

Таким образом, величина магнитных возмущений, обусловленных «электрическим полем E_{KL}», была определена с учётом сезонных изменений проводимости ионосферы. Такой подход обеспечил общее согласие между *PCN* и *PCS* индексами, полученными по магнитным данным станций Туле и Восток, несмотря на существенное различие в величине DP2 возмущений в зимней и летней полярных шапках, и их полное соответствие величине поля E_{KL}.

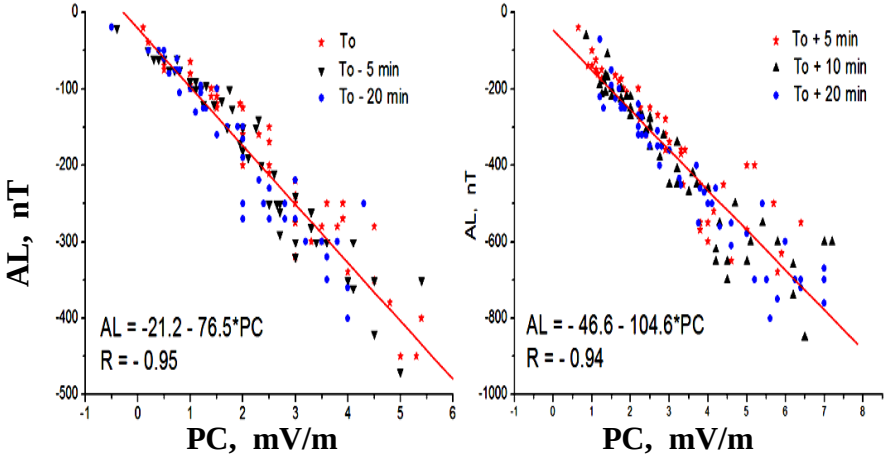
PC индекс и развитие магнитосферной суббури

Момент T=0 – время внезапного начала суббури (SO). Суббури разделены на группы по величине индекса (*PC_0*) в момент внезапного начала суббури SO



Relationship between AL and PC indices

Before SO ***After SO***



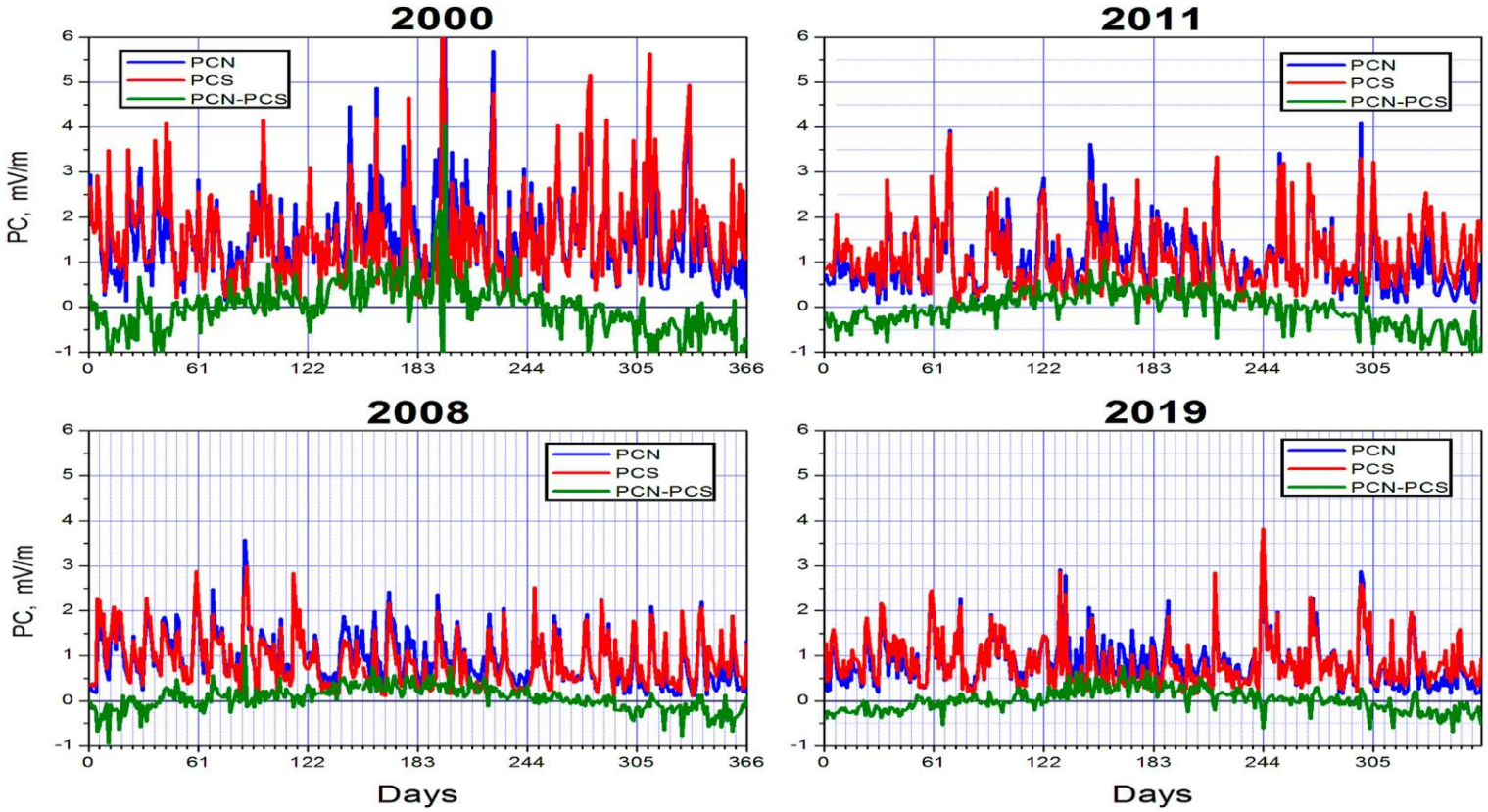
После SO коэффициенты регрессии резко возрастают

Рост PC индекса всегда предшествует развитию суббури.

Внезапное начало суббури связано с резким увеличением скорости роста *PC* индекса.

Линейная зависимость между величинами индексов *AL* и *PC* типична для периодов перед и после SO, независимо от типа и интенсивности суббури.

Различие между величинами PCN и PCS индексов ΔPC=(PCN)-(PCS)



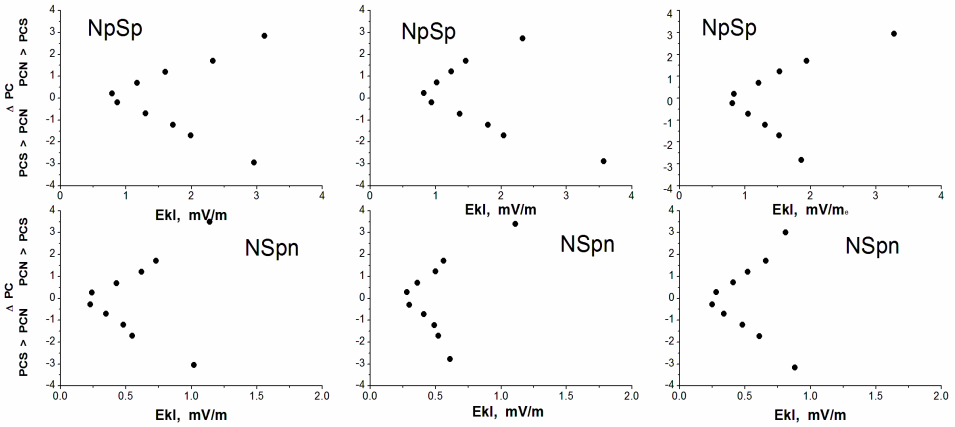
Разность *ΔPC =PCN-PCS* максимальна в годы солнечного максимума и минимальна в эпоху минимума, *PCN* > *PCS* северным летом , *PCS* > *PCN* южным летом, *ΔPC ~ 0* в равноденствие

Расхождение между *PC* индексами в зимней и летней шапках обусловлено эффектом DP3 и DP4 возмущений в летний сезон, т.е. воздействием BY и BZN систем продольных токов.

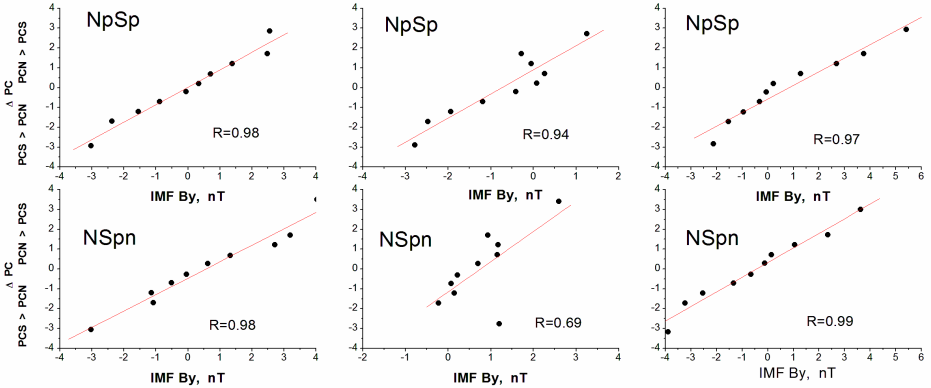
Зависимость разности ΔPC=PCN–PCS от величины поля E_{KL} и B_Y компоненты ММП

EQUINOX NORTH SUMMER SOUTH SUMMER

(a) Relationship between ΔPC=(PCN-PCS) and EKL field



(c) Relationship between ΔPC=(PCN-PCS) and IMF BY component



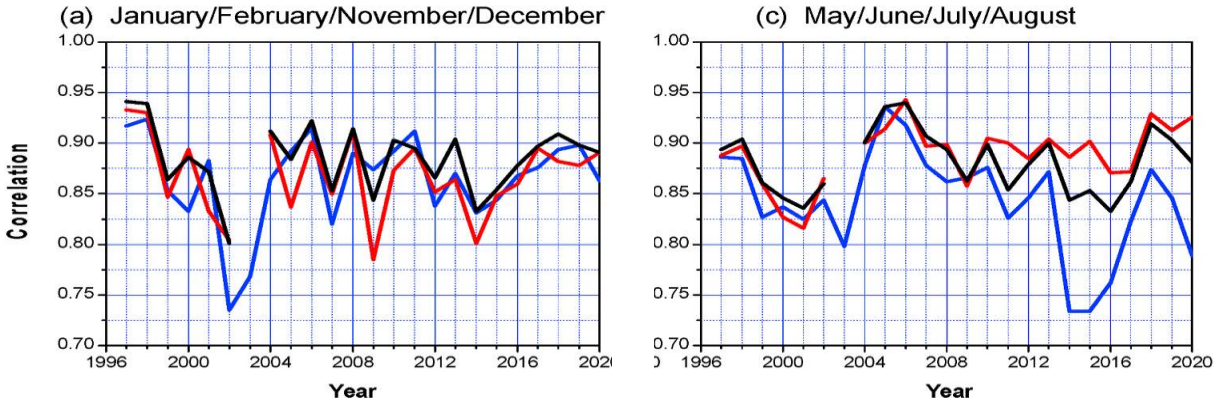
NpSp – положительные значения PCN и PCS индексов
NSpn – противоположные по знаку PCN и PCS индексы

<u>Величина разности</u> $\Delta PC = PCN - PCS$ определяется величиной поля E_{KL}: чем сильнее поле E_{KL} тем больше разность ΔPC.
<u>Знак разности</u> $\Delta PC=PCN-PCS$ определяется знаком By компонентой ММП:
$PCN > PCS$ при $B_Y > 0$,
$PCS > PCN$ при $B_Y < 0$.

Токи в системе BY FAC в северном и южном полушариях имеют обратную полярность, что обуславливает противоположный эффект воздействия BY токов на DP2 возмущения в северной и южной полярных шапках.

Чтобы минимизироать эффект воздействия BY и BZN FAC систем на магнитную активность определяемую полем Ekl следует рассматривать индекс *PCwinter*.

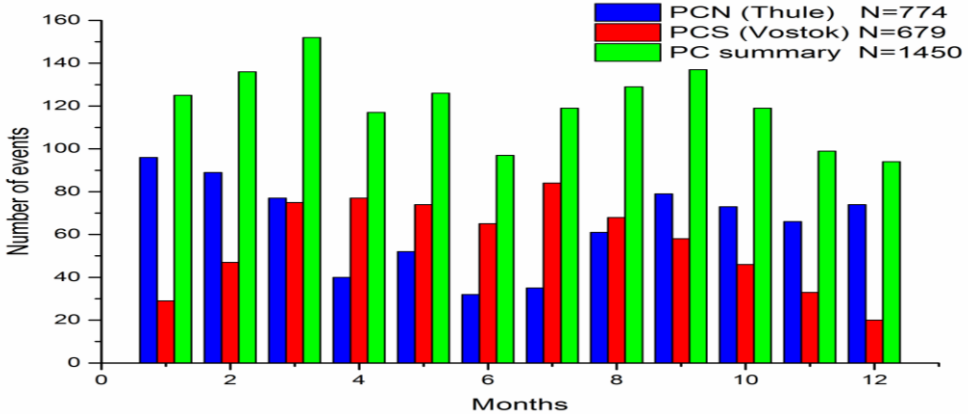
Корреляция между полем EKL и индексами PCN и PCS



Корреляция PCN с полем EKL
выше в сезон (Jan/Feb/Nov/Dec)

Корреляция PCS с полем EKL
выше в сезон (May/June/Jule/Aug)

Корреляция между магнитными суббурями (AL индекс) и PC индексом



Корреляция между индексами *PCN* и *AL*
выше в сезон (Jan/Feb/Nov/Dec)

Корреляция между индексами *PCS* и *AL*
выше в сезон (May/June/July/Aug)

***PC* индекс в зимней полярной шапке *(PCwinter)* обеспечивает более надёжную информацию о воздействии солнечного ветра (поле EKL) на земную магнитосферу (AL индекс).**

Заключение

1. Экспериментальные данные свидетельствуют о двух механизмах влияния солнечного ветра на магнитосферу Земли. **Механизм формирования, при воздействии солнечного ветра, градиентов плазменного давления в магнитосфере** [*Тверской,* 1972; *Antonova and Tverskoy*, 1998; *Antonova*, 2002] **действует всегда и независимо от ориентации ММП. Этот механизм обуславливает постоянную генерацию системы продольных токов R1 внутри магнитосферы и соответствующих магнитных DP2 возмущений в северной и южной полярных шапках. Механизм пересоединения земного и межпланетного полей** [*Dungey, 1961*], **действует только в пограничном слое магнитосферы, в тех областях, где эти поля имеют противоположную направленность**: в околополюсной области при воздействии вертикальной компоненты ММП, в области дневного каспа при воздействии азимутальной компоненты ММП, в результате чего генерируются независимые системы продольных токов BY и BZN и полярные магнитные DP3 и DP4 возмущения.

2. Решающим аргументом в пользу существования двух механизмов генерации продольных токов является фиксация, при воздействии северной компонеты ММП, двух одновременно действующих R1 и BZN систем с продольными токами противоположной полярности и их магнитных эффектов, полярных магнитных возмущений DP2 и DP.

3. ***PC* индекс, характеризует общее воздействие солнечного ветра на магнитосферу Земли («поле *EKL*») и определяется по величине DP2 возмущений, генерируемых R1 FAC системой.**

4. DP3 и DP4 возмущения, генерируются продольными токами BY и BZN FAC, интенсивность которых критическим образом зависит от проводимости ионосферы в полярных шапках, где происходит их замыкание. Поэтому мощность DP3 и DP4 возмущений а, следовательно, и их влияние на структуру регулярных DP2 возмущений, достигает максимума в летней полярной шапке и падает до минимума в зимней шапке.

5. **Для мониторинга геоэффективности солнечного ветра и текущего состояния магнитосферы следует использовать *PCwinter* индекс, определяемый по данным магнитных измерений в зимней полярной шапке.**

Архивные данные (за 1997-2020) и текущие *PCN* и *PCS* индексы, рассчитываемые в режиме реального времени по магнитным данным станций Туле и Восток, представлены на сайте : http://pcindex.org