

**Новый подход в прогнозе полярной
и глобальной геомагнитной
активности: теоретическое и
экспериментальное обоснование**

*Тамара Кузнецова,
Алексей Лаптухов и Валерий Петров*

ИЗМИРАН

2-я научная конференция ПОЛАР-2012, 22-26 мая 2012 года, ИЗМИРАН

Тезисы доклада (что представляем)

- Необходимо направить усилия на понимание физики взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой и методы мониторинга ключевых параметров космической погоды.
- Оспорим распространенное мнение, что $V_z \text{ ММП} < 0$ (или $E_y > 0$) в GSM, (или другой с.к.) - ключевой параметр пересоединения и контролирует процесс взаимодействия. На основе результатов (теории и эксперимента) покажем, что это не так.
- Предложим геоэффективные независимые инвариантные параметры, учитывающие изменение геометрии взаимодействия при орбитальном и суточном движениях Земли. Применим их для решения проблемы годовой и UT вариации ГА, стоящей с 1856 г (Sabine), и представим объяснение этой вариации.
- Представим результаты исследования распределения в году значений $K_p=8-9$, имеющего наряду с классическими пиками вблизи равноденствий максимумы в июле и ноябре, что важно для оценки вероятности возникновения больших возмущений.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД: КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИЧИН ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Результаты, которые использованы в докладе были опубликованы в работах Кузнецова и др. 2002, 2006а, 2006b, 2009а, 2009b, 2010, 2011. Соавторы: А. Лаптухов, В. Кузнецов, В. Петров.

- Зависящие от времени вариации параметров солнечного ветра и ММП. Источник этих изменений – изменения на солнце.
- Временные вариации взаимной ориентации скорости солнечного ветра и ММП относительно геомагнитного момента, возникающие при орбитальном и суточном движении Земли. **Изменение этой геометрии может привести к изменению эффективности взаимодействия с магнитным полем Земли (и ГА) без каких-либо изменений величин параметров солнечного ветра и ММП.**

Учет геометрии взаимодействия и ее проявление в геомагнитной активности – основная цель наших исследований

ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ, УЧИТЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

- **Russell-McPherron механизм, 1973 (RM).**
магнитные поля, лежащие в плоскости солнечного экватора имеют максимальную компоненту, южного направления в GSM вблизи max ГА. **параметр B_z ММП в GSM**
Ключевой угол: между ММП и M_e
- **Теоретическая основа:**
механизм пересоединения Dungey (1961)
- **Основные трудности:**
неспособность объяснить количественно наблюдения, неверная фаза UT вариации
- **Equinoctical механизм (EM) Bartels (1932).**
основан на изменениях эффективности взаимодействия от ориентации диполя по отношению к V солн.ветра.
Ключевой угол: между V и M_e
- **Теория: механизм**
квазивязкого вязкого взаимодействия Boller and Stolov (1970)
- **Основные трудности:**
те же самые, что и для RM

КРИТИКА B_z ММП КАК ГЕОЭФФЕКТИВНОГО ПАРАМЕТРА

$$B_m = (\mathbf{B}, \mathbf{M}) = B_x M_x + B_y M_y + B_z M_z = |\mathbf{B}| |\mathbf{M}| \cos \alpha \quad (1)$$

B_m is a component of the IMF \mathbf{B} directed along the dipole magnetic moment vector \mathbf{M} , α is an angle between the vectors of \mathbf{M} and \mathbf{B} ; $|\mathbf{B}|$ is module of \mathbf{B} .

- В GSM $M_y=0$ (колебания вектора \mathbf{M} в YZ -плоскости отсутствуют), значит $B_y M_y=0$ in (1), т.е. влияние B_y ММП не учитывается в GSM (B_y -дополнение к правой с.к.).

Изменения геоэффективности B_y ММП при орбитальном и суточном движениях магнитного момента Земли M_e должны учитываться!

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ КАК ОСНОВНОЙ ПАРАМЕТР СКОРОСТИ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ

■ V_z не является основным параметром в физических моделях пересоединения. Основным параметром, который определяет скорость пересоединения, является электрическое поле E

■ E не является результатом процесса, а внешним независимым параметром, который практически полностью определяет скорость пересоединения независимо от условий задачи. (Vasyliunas, 1975
Pudovkin, 1976)

**Ориентация электрического поля солнечного ветра E
относительно геомагнитного момента - основной
эффективный параметр в нашем исследовании**

Инвариантные независимые от системы координат параметры пересоединения

We assume that **reconnection in general case of arbitrary oriented fields** is determined by three parameters (Kuznetsova and Laptukhov, 2002)

$$B_m = (\mathbf{B}, \mathbf{M}) = B_x M_x + B_y M_y + B_z M_z = |\mathbf{B}| |\mathbf{M}| \cos \alpha, \quad (1)$$

B_m is a component of the IMF \mathbf{B} directed along the dipole magnetic moment vector \mathbf{M} , α is an angle between the vectors of \mathbf{M} and \mathbf{B} ; $|\mathbf{B}|$ is module of \mathbf{B} . Here and below $|\mathbf{M}|=1$ for simplicity.

$$E_m = (\mathbf{E}, \mathbf{M}) = V(M_z B_y - M_y B_z) = |\mathbf{E}| [(M_y)^2 + (M_z)^2]^{1/2} \cos(U_{em}), \quad (2)$$

E_m is a component of the solar wind electric field \mathbf{E} along the geomagnetic moment vector \mathbf{M} . \mathbf{V} is directed along X (GSE), see (2a); U_{em} is angle between vectors \mathbf{E} and \mathbf{M}

$$E_{mv} = (\mathbf{E}, [\mathbf{M}, \mathbf{V}]) / (|\mathbf{M}| |\mathbf{V}|) = V(M_y B_y + B_z M_z) = |\mathbf{E}| [(M_y)^2 + (M_z)^2]^{1/2} \cos(U_{emv}) \quad (3)$$

$\mathbf{E} = [\mathbf{B}, \mathbf{V}]$ is vector of the electric field of the solar wind, \mathbf{V} is vector of velocity of the solar wind and $V = |\mathbf{V}|$ is its value, E_{mv} is a parameter that is proportional to a component of the solar wind electric field E_{\perp} along the $[\mathbf{M}, \mathbf{V}]$ vector.

$\cos \alpha$, $\cos U_{em}$, $\cos U_{emv}$ можно рассчитать на основе измерений, а их влияние на Γ_A можно оценить количественно

РЕЗУЛЬТАТЫ: ЗАВИСИМОСТЬ K_p ОТ УГЛА МЕЖДУ ММП И ГЕОМАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ

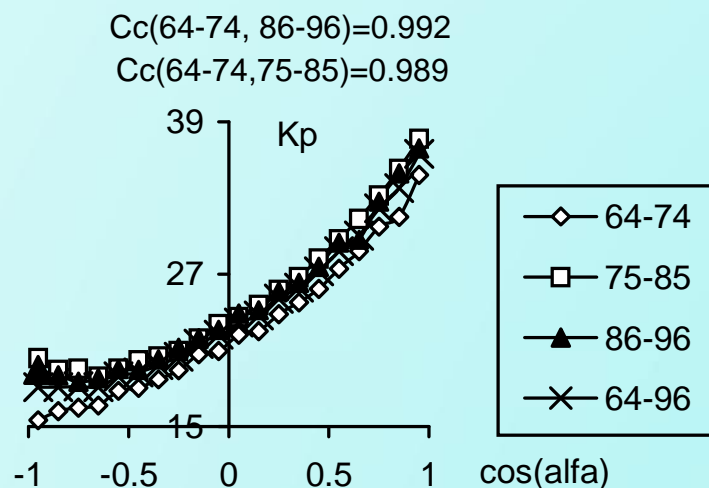


Fig. 1. Dependence of K_p from $\cos(\alpha)$ for different years, where α is angle between vectors of M and IMF. C_c - correlation coefficient between data from different years.

■ При повороте ММП от **севера** ($\cos\alpha = -1$) к **югу** ($\cos\alpha = 1$) K_p изменяется от $K_p=15$ до $K_p=40$; $\Delta K_p=25$ при изменении $\cos\alpha$. $\Delta K_p \sim 25$, K_p объясняет 40% изменений.

■ Кривые $K_p = F(\cos\alpha)$ для различных лет коррелируют друг с другом с $C_c = 0.99$, отличаясь уровнем K_p :

$\cos\alpha$ - геометрический фактор, повторяющийся год от года и объясняющий ~ 35-40% изменений K_p .

ЗАВИСИМОСТЬ K_p ОТ E_{mv} (КОМПОНЕНТЫ E , ПОПЕРЕЧНОЙ M_e В ПЛОСКОСТИ YZ GSE с.к.)

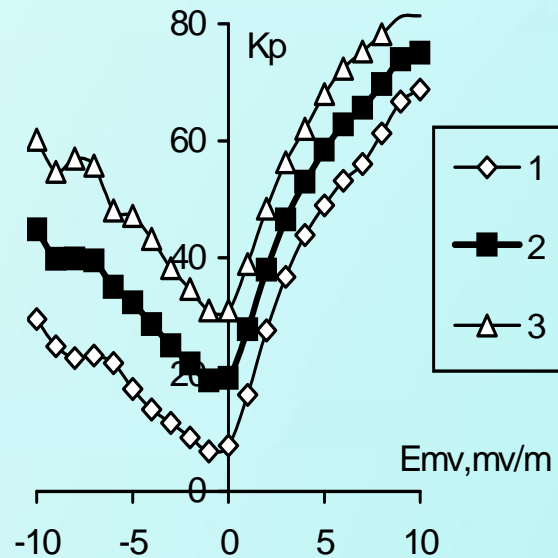
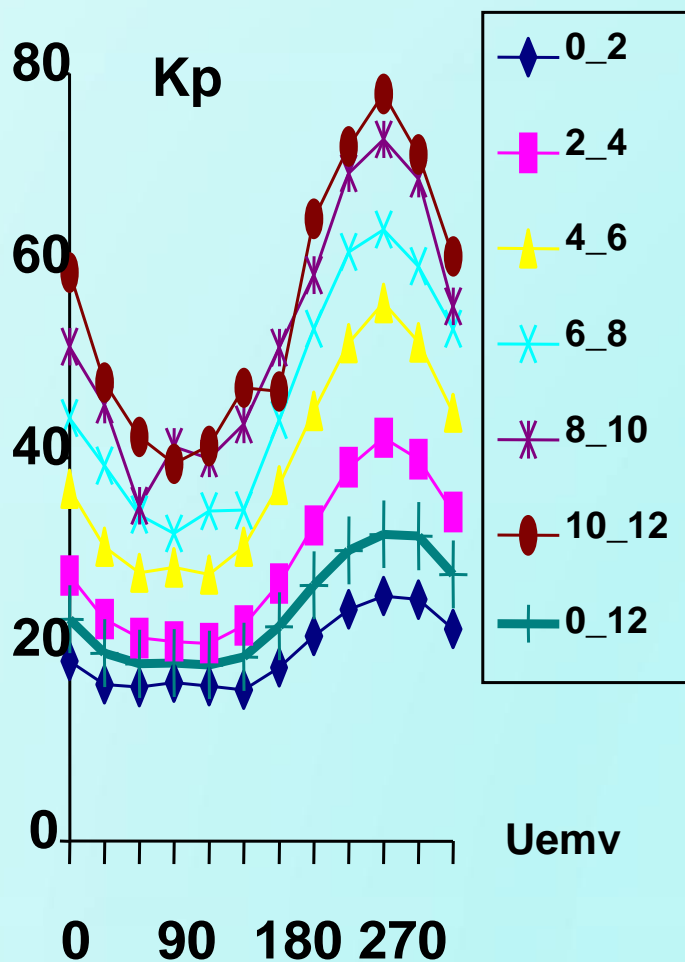


Fig. 2. K_p index as function of E_{mv} taking into account standard deviation (curve 1 from mean curve 2).

- E_{mv} объясняет ~95% K_p изменений
 - K_p несимметрично относительно знака E_{mv} : Быстрое увеличение K_p с увеличением E_{mv} при $E_{mv} > 0$ (поле E с утра на вечер) и медленное при $E_{mv} < 0$
 - Геоэффективность поля утро-вечер E_{mv} в ~ 2 раза больше, чем поля обратного направления
- E_{mv} объясняет ~95% K_p изменений**

Зависимость K_p от угла между электрическим полем и геомагнитным моментом



- ← Фиг. Зависимость K_p от угла U_{em} между векторами M и E для разных диапазонов величины E .
- При $U_{em}=0^\circ$ ($E \uparrow \uparrow M$) и $U_{em}=180^\circ$ ($E \uparrow \downarrow M$) K_p принимает средние значения
- При $U_{em}=90^\circ$ ($E \perp M$ и направлено с вечера на утро) K_p имеет минимум
- При $U_{em}=270^\circ$ ($E \perp M$ и направлено с утра на вечер) K_p имеет максимум

ГА изменяется при постоянной величине $E=10$ мВ/м в диапазоне $K_p=6 \pm 2$ из-за изменения только угла U_{em} , достигая $K_p=6$ при северном направлении ММП V_z из-за роста компоненты E_m

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КЛЮЧЕВЫХ УГЛОВ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ НА K_p

$\cos\alpha$	$0 \leq \cos\beta \leq 0.573$						$K_p(\cos\alpha)$
	1	2	3	4	5	6	
-0.9	18.77	18.36	18.01	18.16	18.72	18.02	18.33
-0.7	18.76	18.33	17.75	18.34	18.17	18.66	18.29
-0.5	19.47	19.16	19.22	19.28	19.43	20.03	19.39
-0.3	20.72	20.4	20.08	20.41	20.72	21.3	20.53
-0.1	22.63	22.02	21.78	22.31	22.13	21.99	22.13
0.1	25.02	24.32	23.13	23.37	23.05	22.77	23.68
0.3	28.15	26.89	25.33	24.94	24.01	23.01	25.63
0.5	30.99	29.84	28.62	27.37	25.78	24.4	28.14
0.7	34.42	33.37	31.47	30.01	28.69	26.74	31.21
0.9	37.87	36.66	35.74	34.35	33.09	30.91	35.17

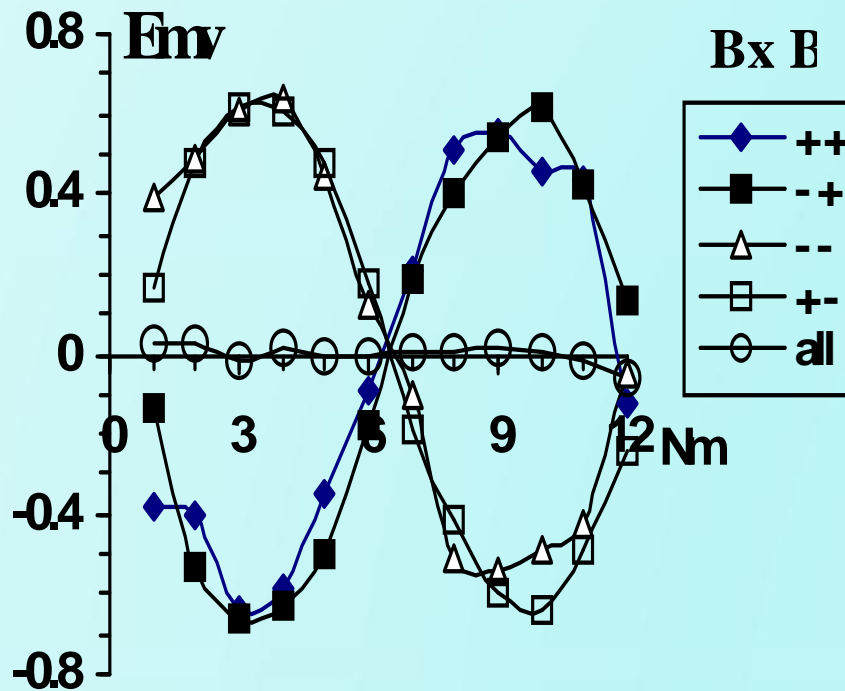
$K_p(\cos\beta)$ 25.15 24.32 23.47 23.39 22.91 22.46

$\cos\beta = (V, M) / |V| |M| = M_x / M$, where $|M| = 1$, β - угол между M_e и V ;

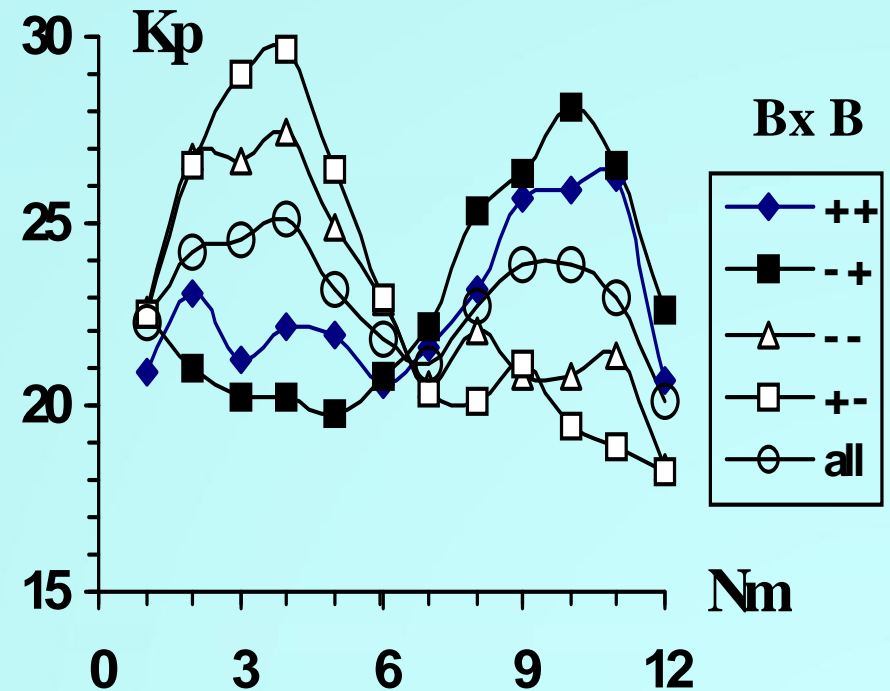
- $\cos\beta$ (угол V и M_e , квазивязкое взаимодействие и равноденственная модель) отвечает за ~15% изменений K_p , $\cos\alpha$ (угол ММП V and M_e , Dangey and RM-модель) - for 35%, U_{em} (E and M_e) за 50%.

ГОДОВАЯ ВАРИАЦИЯ K_p and E_{mv} ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ММП В ПЛОСКОСТИ XY GSE

Annual variation E_{mv} (mV/m) for different directions of IMF at the XY plane (GSE) shown by signs B_x B_y

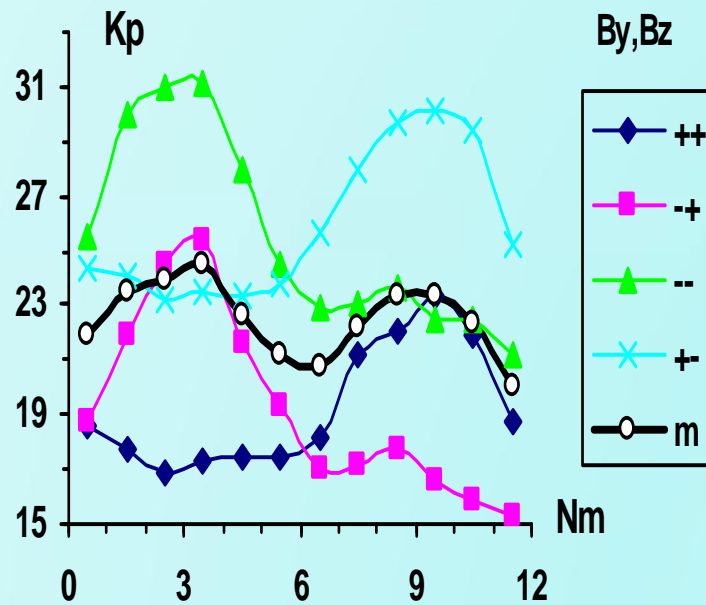


Annual variation of K_p for different directions of the IMF at the XY plane (GSE) shown by B_x, B_y

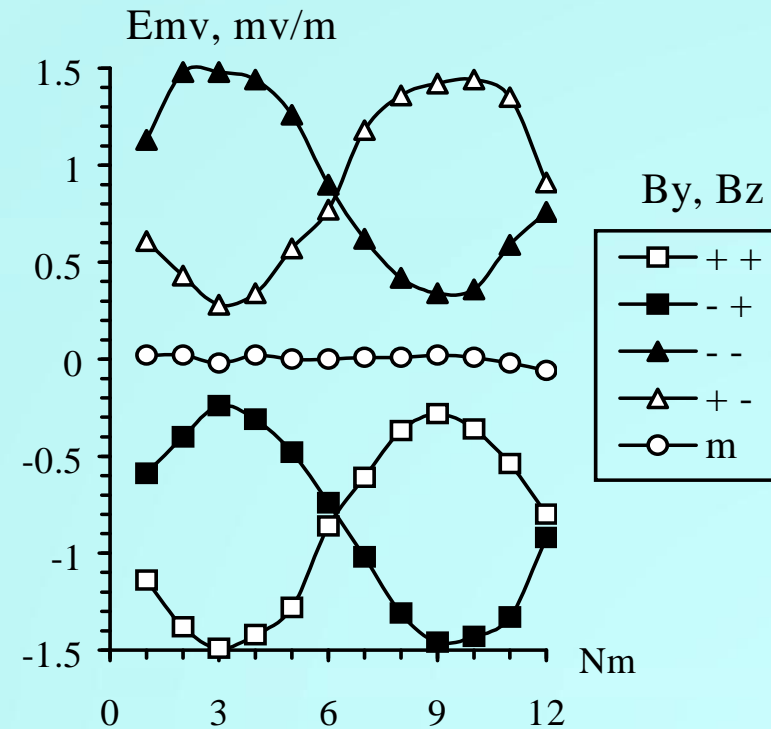


ГОДОВАЯ ВАРИАЦИЯ K_p and E_{mv} ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ММП В ПЛОСКОСТИ YZ GSE

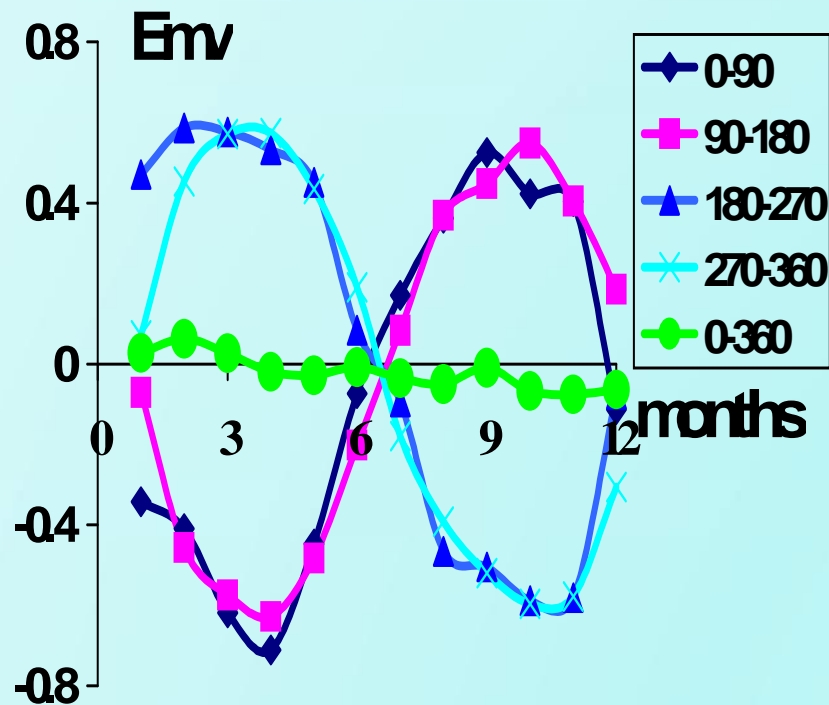
Annual variation of K_p for different directions of the IMF at the ZY plane (GSE) shown by B_z , B_y



Annual variation of E_{mv} for different directions of the IMF at the ZY plane (GSE) shown by B_z , B_y



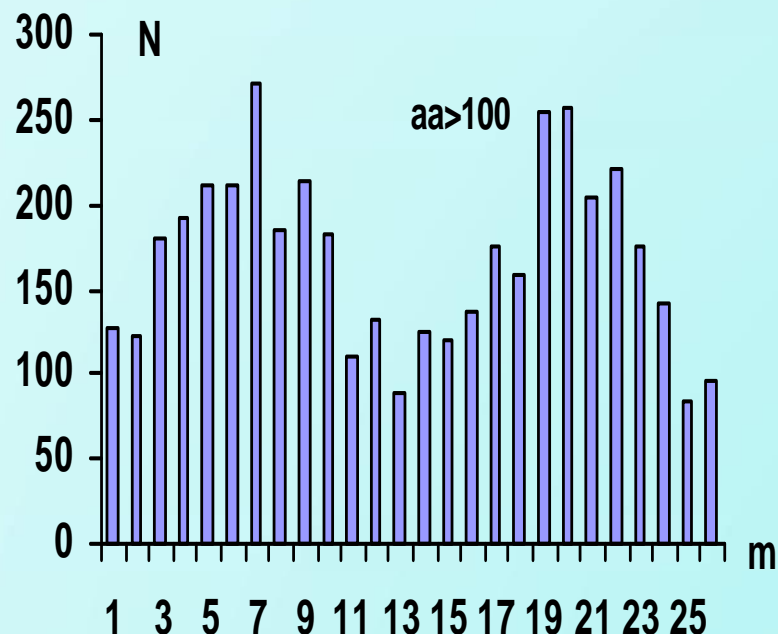
НОВОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ ПОЛУ-ГODOVOЙ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ



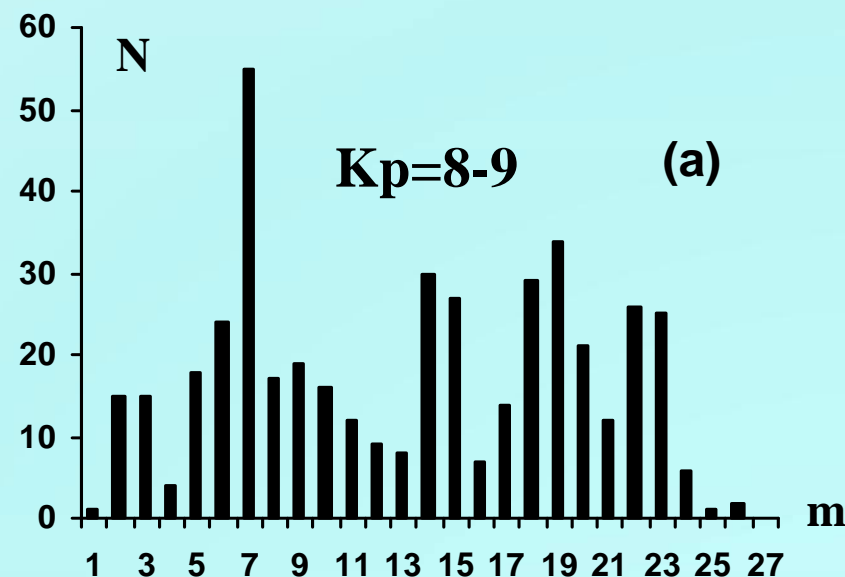
Annual variation of E_{mv} for d direction of the IMF (angles of Parker).

- $E_{mv} = V(MyV_y + VzM_z)$
 $V_z \sim 0$ при данных за 1963-2005г
(симметрия относительно знака V_z)
- $E_{mv} = VMyV_y$
Расчеты показывают: $M_y < 0$ в 1-ю половину года, $M_y > 0$ во 2-ю, значит $V_y < 0$ эффективна в 1-ю половину года, а $V_y > 0$ – во 2-ю (E_{mv} должно быть > 0)
- Фаза определяется годовой вариацией k -ты M_y магнитного момента в плоскости, \perp линии Солнце-Земля: экстремумы в равноденствия, 0- в солнцестояния. Амплитуда модулируется компонентой E_z солнечного ветра, \perp плоскости эклиптики

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БОЛЬШИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ГОДУ



Annual distribution of counts with values $aa > 100$ nT. N , m is number of 14-day interval for year, 1868-2004.

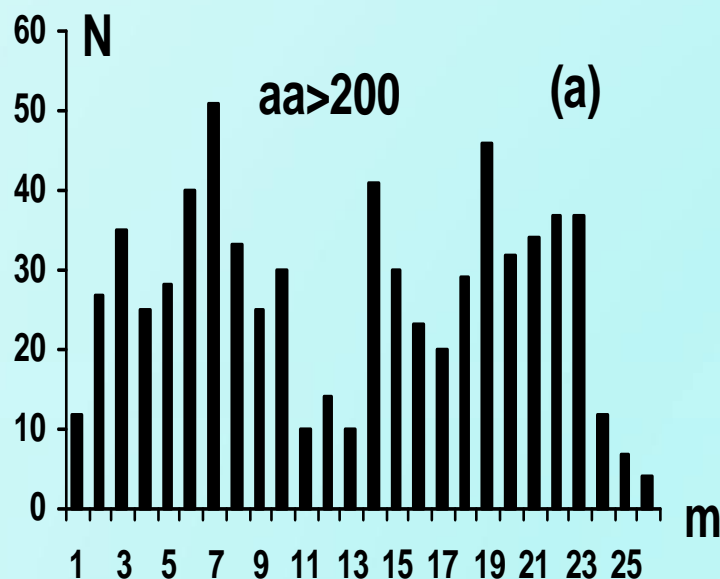


Annual distribution of counts with values $K_p = 8-9$. N , m is number of 14-day interval for year, 1932-2004.

Peaks: 4 April ± 7 days ($m=7$), 28 September ($m=19$), 24 July ($m=14-15$), ($m=23-24$)-18 November.

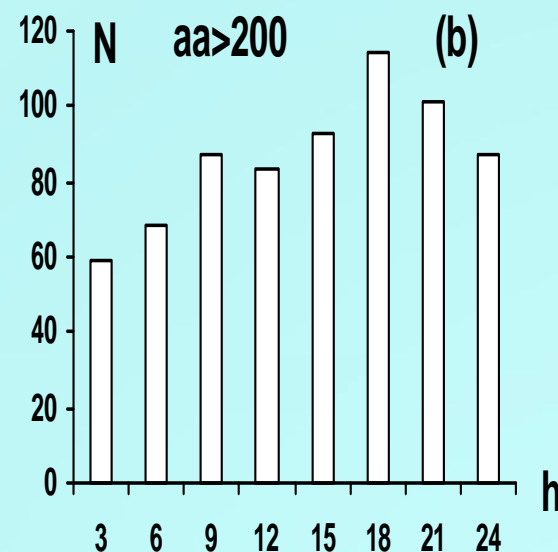
■ **Дополнительные пики в июле и ноябре, увеличенный пик в марте-апреле.**

ГОДОВОЕ И УТ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ С ИНДЕКСОМ $AA > 200$ нТ



Annual distribution of quantities N with $aa > 200$ nT for the period 1868-2004, m is number of 14-days interval in a year.

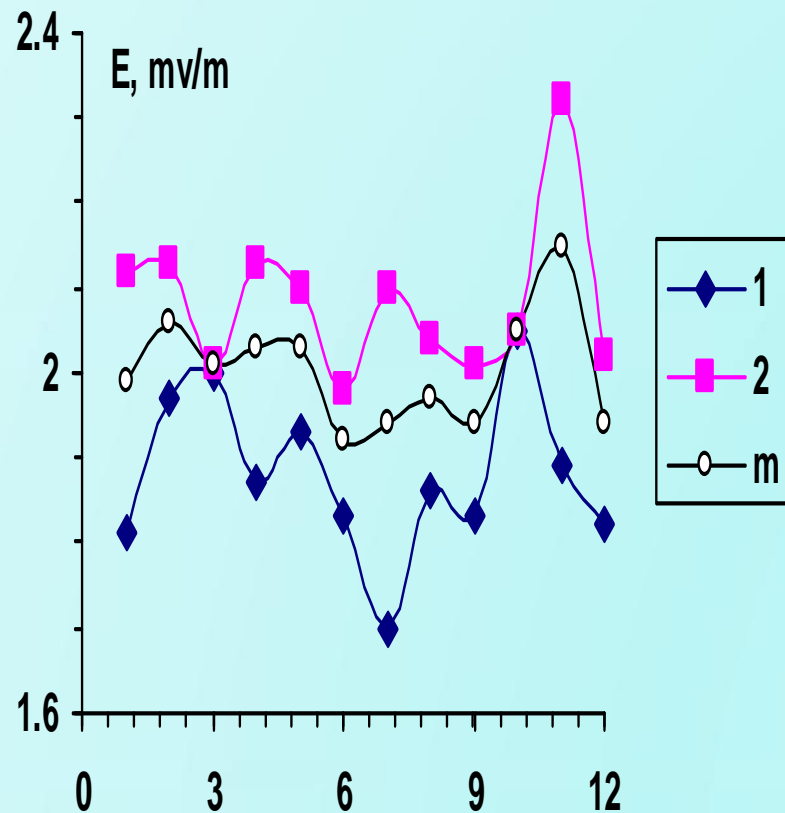
Spring peak in March ($m=7$). Fall peak in September ($m=19$). **Additional peak in July ($m=14$)** and smoothed peak in November



UT distribution of quantities with $aa > 200$ nT N for the period 1868-2004, h is UT

■ **Дополнительные пики в июле и ноябре. Максимум УТ распределения в 18 часов**

ГОДОВАЯ ВАРИАЦИЯ ВЕЛИЧИНЫ Е-ПОЛЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ЧЕТНЫХ-НЕЧЕТНЫХ ЦИКЛАХ АКТИВНОСТИ



Годовое распределение величины E в году: 1 (четные) - N20+22, 2 (нечетные) - N21+23,

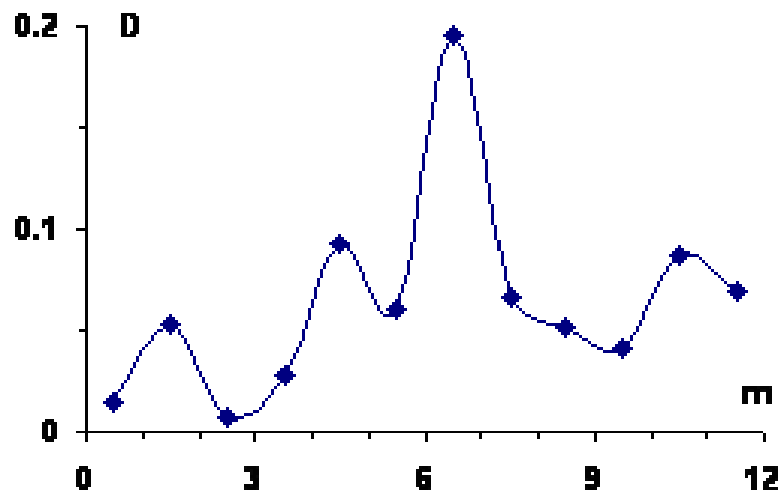
В нечетных циклах E больше, чем в четных. В циклах 2 пики (июль, ноябрь, апрель) с $T \sim 150$ д (Rieger, 1984). У нас в W $T = 146.2$ д; $365.24 \text{d} / 146.2 = 5/2$

$1/0.9 = 1/11 + 1/1$ (1/г) - **0.9 г = 3/5 г** – проявление 11-л. цикла на земле

Величина E в марте и октябре не зависит от четности-нечетности солнечного цикла

Наибольшие отличия величин E в четных и нечетных циклах в ноябре, июле и апреле

Годовая вариация разности величин поля E солнечного ветра в циклах по максимуму W



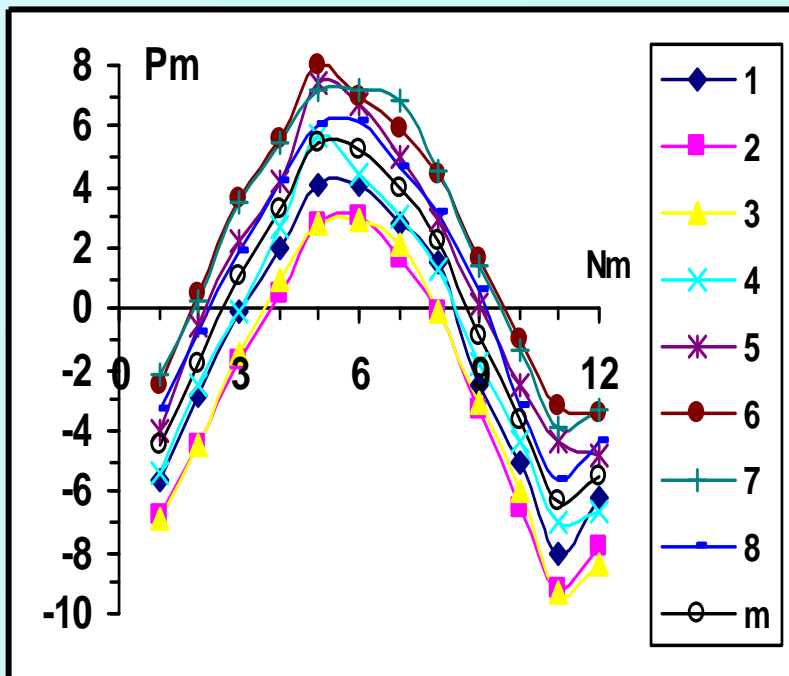
Годовая вариация разности D величины поля солнечного ветра E мВ/м в двух группах данных $D = E(1) - E(2)$; 1 – нечетным - четным циклом (по максимумам W), 2 – между последующим четным - нечетным

■ Максимумы разностей в июле, мае и ноябре (E между циклами)

■ В июле $D = 20\%$ от среднего уровня $E = 1$ мВ/м ($D = 0.2$ мВ/м)
В мае и ноябре $D = 10\%$.

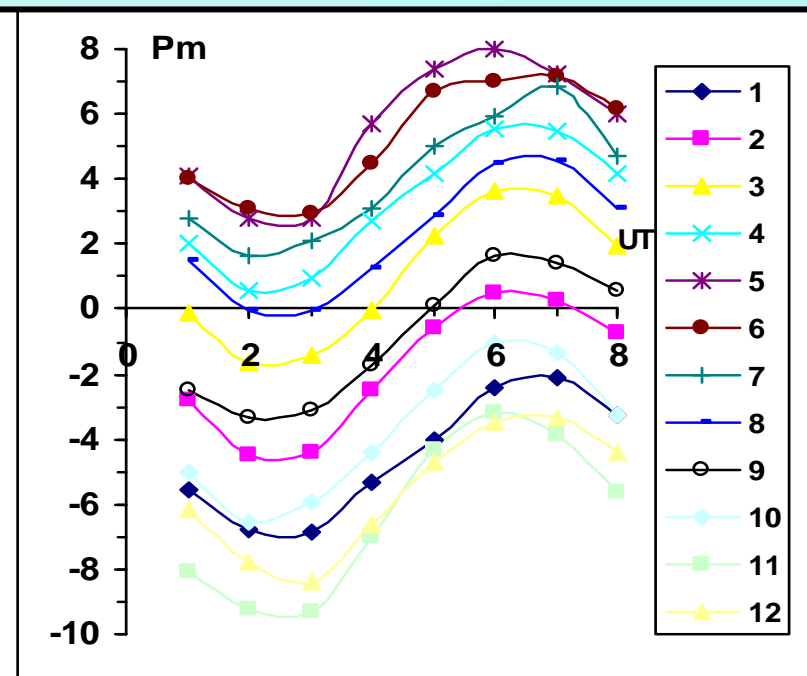
■ май и ноябрь - пики скоростей поступления электромагнитной энергии в полярные шапки (слайд 19)

ГОДОВАЯ И UT ВАРИАЦИЯ КОМПОНЕНТЫ ВЕКТОРА ПОЙТИНГА ВДОЛЬ ГЕОМАГНИТНОГО МОМЕНТА



Annual variation of Pm, component of Poyting flux ($P=E \times H$, w/m) along moment M_e , for 8 of 3-hour intervals of UT

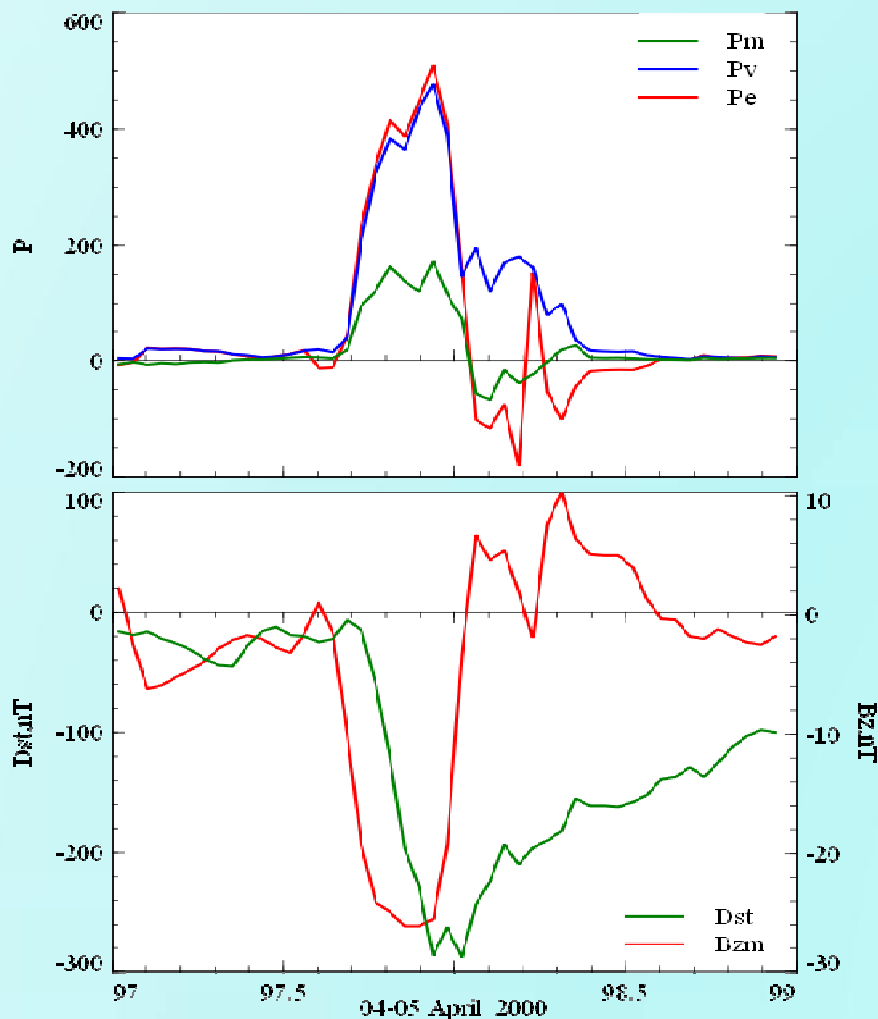
$P_m > 0$ имеет максимум в Мае (СП); $P_m < 0$ Ноябрье (ЮП).




UT variation of Pm for 12 months

Пики в мае и ноябре не зависят от знака секторной структуры ММП, амплитуда синусоиды зависит от E_z и B_y

Концепция магнитной бури с $V_z < 0$ как причиной и буря 4.04.2000 г.



- Тмин $V_z < 0$ на ~2 ч. раньше Тмин Dst – не объяснить $V_z < 0$ -противоречит результатам моделирования пересоединения (через 30-40 мин после минимума $V_z < 0$ все эффекты затухают). Какова причина депрессии Dst ~1.5 ч.?
- **Начало бури: резкий рост компонент вектора Пойтинга**, описывающих скорость поступления энергии (э-м) к магнитопаузе и северной полярной шапке. **Время мин. Dst= -287 нТ это экстремумы $P_e > 0$, $P_m > 0$, P_v**
- **Есть бури с главной фазой при северном V_z ММП!**



2-я научная конференция ПОЛАР-2012, 22-26 мая 2012 года, ИЗМИРАН

■ **СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !**

*Заинтересованным могу выслать нашу
последнюю статью*

*Advances in space Research v. 47, 978–990,
2011, doi:10.1016/j.asr.2010.11.022*