

# Моделирование поведения плотности космических лучей в магнитных облаках



Е. ЕРОШЕНКО, А. БЕЛОВ, А. АБУНИН, М. АБУНИНА, В.  
ОЛЕНЕВА, В. ЯНКЕ (IZMIRAN)

А. ПАПАИОАННОУ

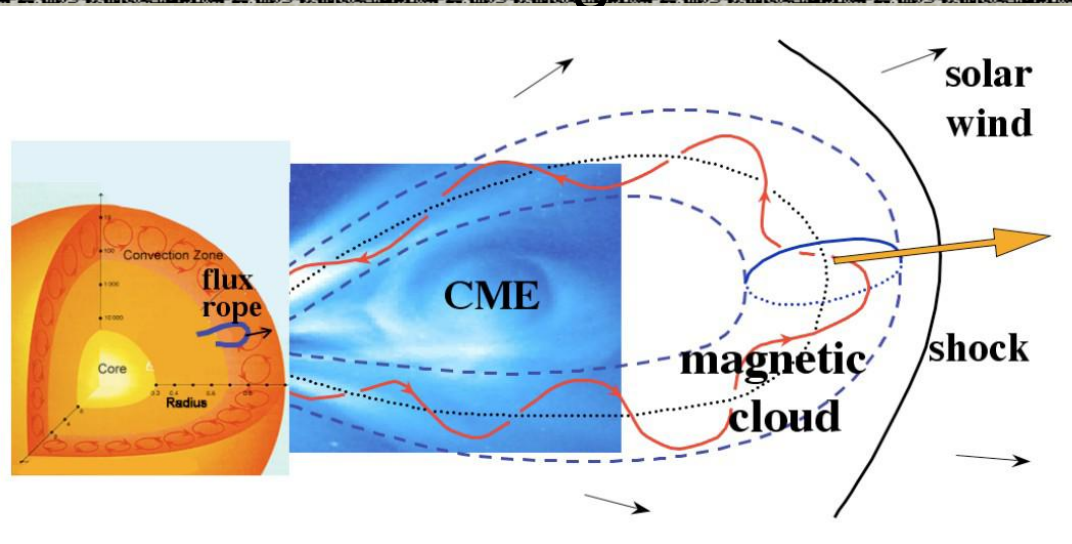
Е. МАВРОМИЧЛАКИ (Athens University)

*erosh@izmiran.ru*



33-я ВККЛ, Москва, МГУ, Дубна, 2014

# What are the magnetic clouds?



Burlaga, 1981  
Barnden, 1973  
Ivanov  
Sanderson, 1990  
Zank, 1988  
Cane, 1993, 2000  
Wibberenz, 1998

## Почему мы их изучаем?

МО приходит к Земле, сохраняя солнечную структуру  
Все ICME, приходящие к Земле, имеют 'flux rope'  
структуру, но...

Магнитные облака тесно связаны с ФП.

ФП возникают при расширении частично закрытых  
магнитных структур.

МО – наиболее очевидный пример такой структуры



**Присутствие МО в ICME значительно повышает способность этого возмущения модулировать КЛ;**

**Как правило, вектор анизотропии КЛ резко изменяется, когда Земля входит и выходит из МО, и регулярно изменяется внутри МО;**

**Поведение КЛ внутри МО отражает как свойства облака в целом, так и его структуру;**

**Эти изменения (вместе с данными о плотности КЛ) могут дать дополнительную информацию о структуре МО и его положении относительно Земли.**



## Воздействие МО на ГКЛ

1. Данные и методы;
2. МО и ФП – примеры различных групп ;
3. Модель описания поведения ГКЛ;
4. Исправление на магнитосферный эффект;
5. Причины расхождений;
6. Статистический анализ
7. Заключение






## Данные и метод

1. Каталог ICME за 1996 - 2009 (Richardson and Cane, Solar Phys. 264 (2010) 189-237: свойства ICMEs, их солнечные источники, сопутствующие геомагнитные эффекты;
2. База данных по Форбуш эффектам, созданная в ИЗМИРАНе, основанная на вариациях плотности и анизотропии КЛ с жесткостью 10 ГВ (GSM).

Содержит параметры КЛ за пределами атмосферы и магнитосферы, индексы геомагнитной активности, солнечные параметры.

99 событий оказались в выборке ICME с МО в течение 23 и 24 солнечных циклов.

Их объединяет присутствие МО, но все они очень разные.



**ICME** - очень короткие и продолжительные, быстрые ( $>1000\text{ km/s}$ ) и медленные ( $<400\text{ km/s}$ ), с сильным и умеренным ММП (В  $50\text{ nT}$  and  $\sim 8\text{ nT}$ ).

**Обусловленные явления:** экстремальные и малые магнитные бури ( $K_p \sim 4$ );

**Вариации КЛ:** Максимальные ФП ( $\sim 28\%$ ) и несколько малых ФП ( $\leq 0.5\%$ );

**В среднем:**

$A_F = 3.4 \pm 0.4\%$ ), сопровождавшийся ( $A_p_{\text{max}} = 98 \pm 9$  (2нТ), и  $Dst_{\text{min}} = -103 \pm 8$  нТ) – умеренная буря.

Только 62 из 99 событий начинались с приходом ударной волны.

**Сравнение выборки ICME с МОс контрольной группой событий со схожими параметрами возмущений  $5 < V_m * V_m < 7.1$**



## Различные усредненные характеристики ФП в главной и контрольной группах

	(с МО)	(без МО)
Af	3.36±0.37	1.91±0.16
■ Axy_max	2.03±0.13	1.38±0.08
■ Az_range	2.04±0.10	1.36±0.06
■ Dmin	-0.93±0.11	-0.44±0.03
■ Apmax	97.87±8.65	56.64±3.51
■ Dst_min	-102.6±8.2	-56.5±3.8
■ Bm	20.21±1.07	18.01±0.33
■ Vm	551.5±16.5	652.2±9.1
■ VmBm	6.05±0.54	5.79±0.07

**ICMEs с МО более эффективно модулируют КЛ, создавая более глубокие ФП (Af) с более быстрым спадом плотности КЛ(Dmin) и с большей величиной анизотропии КЛ.**

Af-Величина ФП (%), Axy\_max – max экваториальная компонента вектора анизотропии КЛ (%); Az\_ – область изменения северо-южной компоненты вектора анизотропии КЛ (%); Dmin – max часовой декремент плотности КЛ; Bm (nT) и Vm (km/s) – max интенсивность ММП и скорость солнечного ветра в возмущении, VmBm -нормализованное произведение Vm и Bm





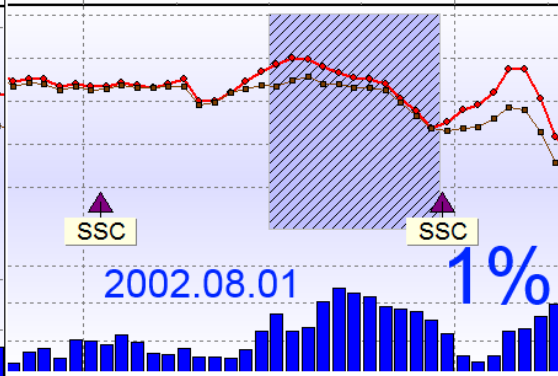
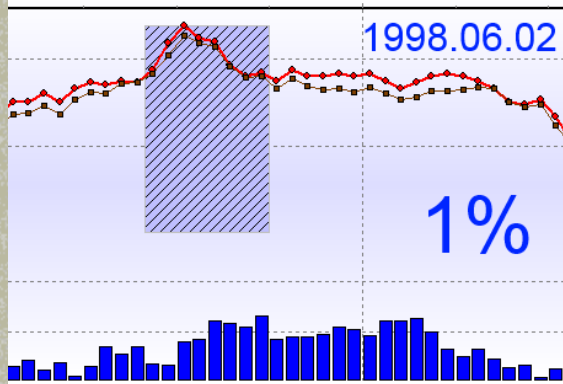
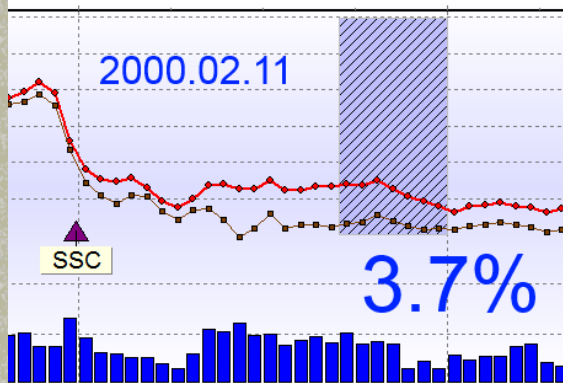
Большое разнообразие магнитных облаков обуславливает ФП различной глубины и разнообразных профилей. Цифрами обозначены даты и величина ФП.





## Increase of CR in MC

Эффект возрастания  
плотности КЛ внутри  
магнитного облака.





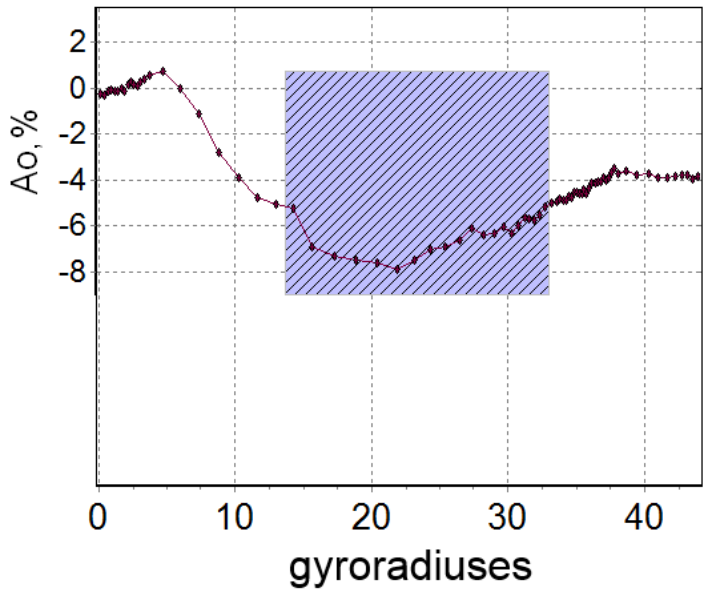
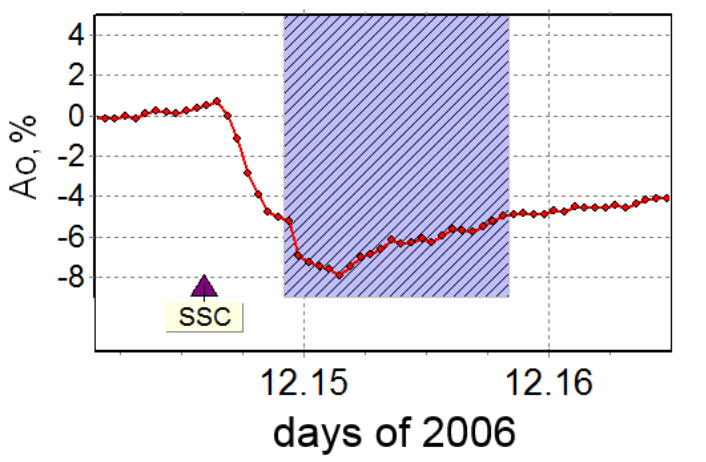
## Распределение плотности КЛ в структуре МО

Значительная часть МО, наблюдаемых у Земли, имеют квазицилиндрическую геометрию.

- Простейшей функцией, способной отобразить распределение плотности КЛ в цилиндрической структуре МО, является парабола.
- При моделировании надо помнить:
- Земля, пересекая межпланетное возмущение, проходит за час разное расстояние в соответствии со скоростью этой части возмущения.
- Для заряженных частиц расстояния измеряются в гирорадиусах  $\rho$ : за час наблюдатель проходит в межпланетном возмущении (в частности, в МО)
- $X_{\rho} = cVB/R$  гирорадиусов




# Моделирование: изотропная часть КЛ



При переходе от линейных размеров к гирорадиусам можно ожидать более симметричных распределений плотности КЛ в магнитном облаке

Эффект МО в КЛ: распределение плотности во временной развертке и в зависимости от гирорадиуса



Второе важное обстоятельство- магнитосферные вариации КЛ во время магнитных бурь (из-за изменения  $R_s$  в пунктах наблюдения. Вариации  $R_s$  и скорости счета тесно коррелируют с вариациями Dst индекса.

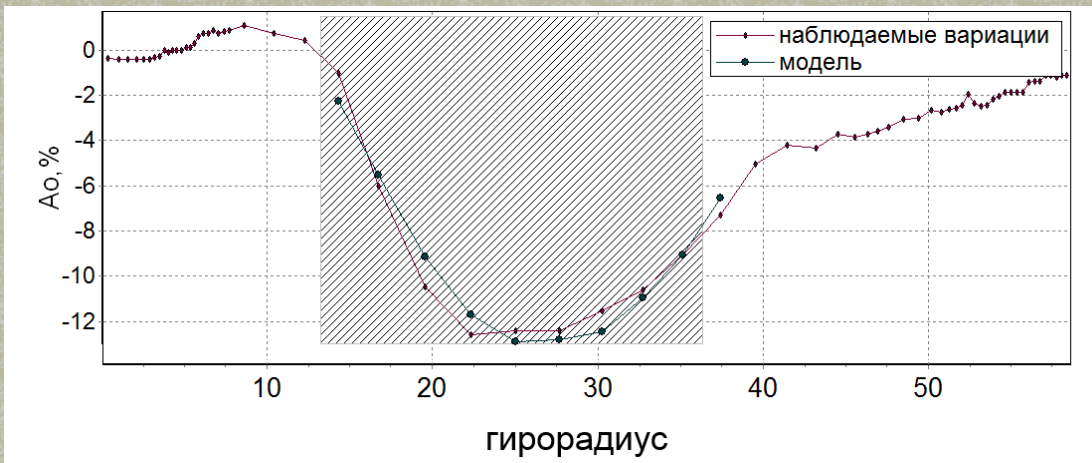
Ожидаемая вариация плотности:

$$\delta = \frac{\Delta N}{N} = a + b_1 X + b_2 X^2 + b_d D_{st}$$

- где  $a$  константа,  $b_1$  – трендовый коэффициент,  $b_2$ -отражает главную часть влияния МО на КЛ,  $b_d$  определяет вклад магнитосферы
- Мы применили эту модель ко всем 99 событиям выборки, каждый раз определяя параметры,  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_d$ .



## Пример моделирования плотности вариаций КЛ в магнитном облаке.



$MO > 4 \rho$   
 $\sigma^2$  – not big  
74 события

### Событие 2004.07.26.

Почти симметричные изменения плотности КЛ внутри МО, с минимумом вблизи центра МО (в большинстве событий).

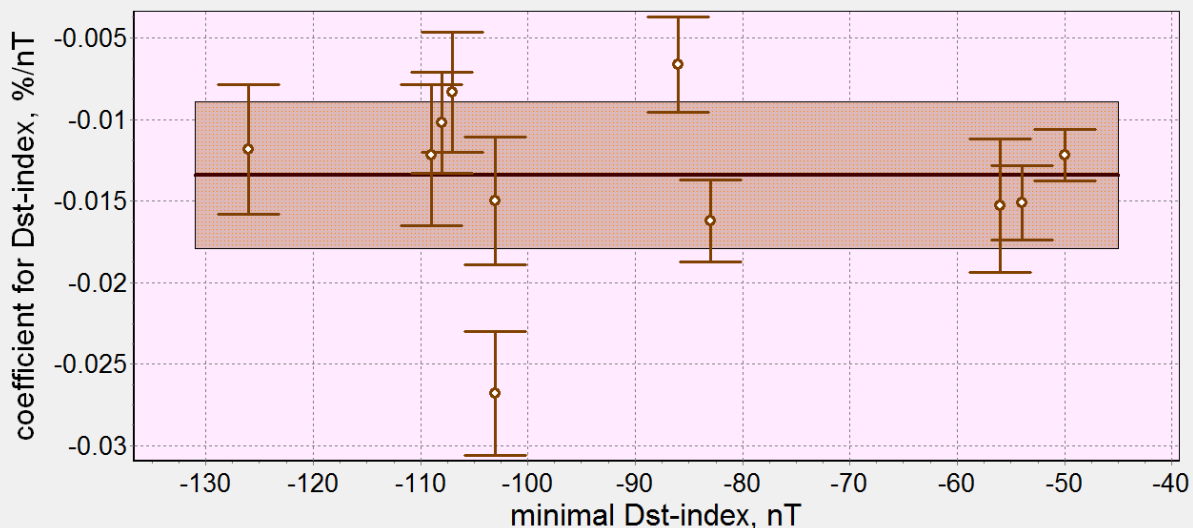
Хорошее согласие модельных и экспериментальных данных.

Но совпадение наблюдается не всегда. Основные причины расхождений:

-упрощение в виде цилиндра в ряде случаев непригодно (большая дисперсия; низкий коэф. корреляции)

-зависимость от числа часов, проведенных в облаке (6 - 64). В среднем длительность МО  $21 \pm 1$  часов.

## Статистические результаты моделирования



$b_d$

### Зависимость $b_d$ от минимального Dst-индекса

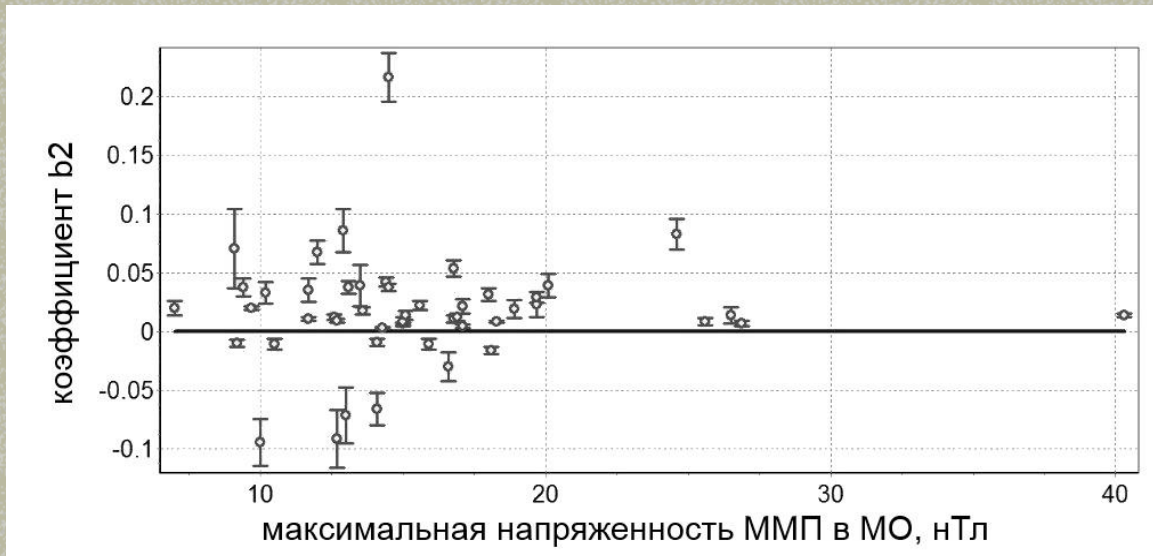
Горизонтальная линия – коэффициент  $b_{dm}=0.0136 \pm 0.0016\%/nT$ , усредненный по событиям нахождения Земли в МО.

Распределение точек и ошибки согласуются со стандартным отклонением  $\sigma$ . Выпадающая точка – февраль 1998 г.

Зависимость  $b_d$  от Dst не наблюдается, т.е.

во всех событиях связь магнитосферных вариаций с КЛ-одна и та же, и определяется полученным коэффициентом  $b_d$ .

Чтобы выделить статистически значимый вклад в модель, отобрано 39 событий, для которых  $b_2/\sigma_{b_2} > 2$ .



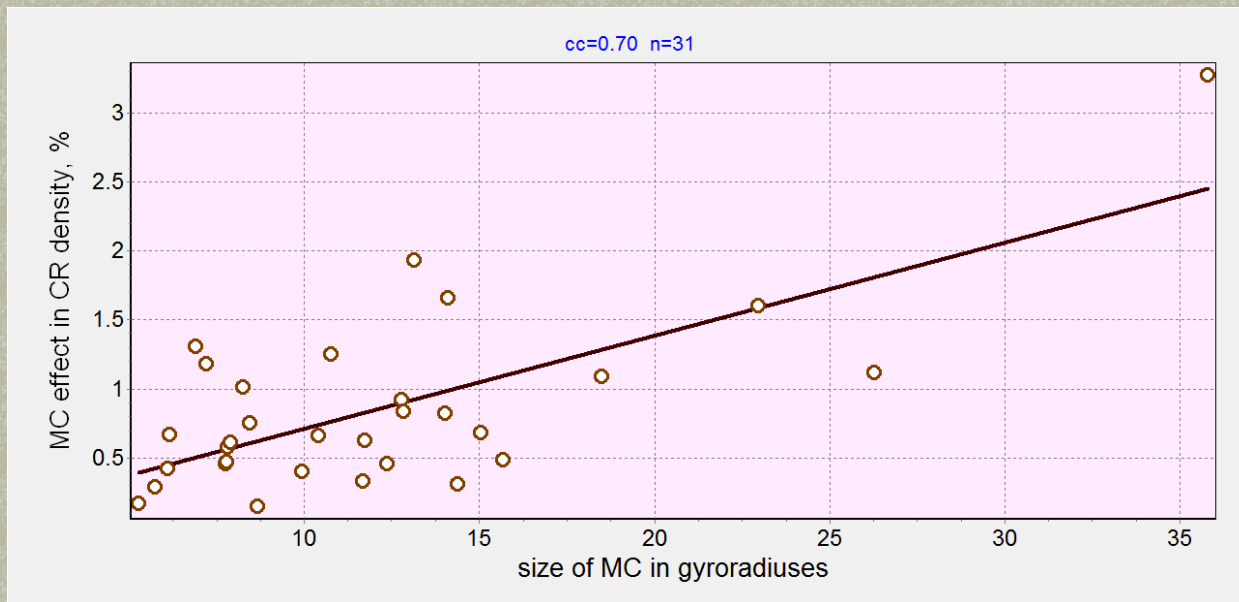
$b_2$

Явной зависимости  $b_2$  от  $V_{max}$  не наблюдается.

Все отрицательные  $b_2$  наблюдались в относительно слабом поле, а для  $V_{max} > 18$  нТ все  $b_2$  положительны, т. е., в случаях сильного поля мы всегда имеем «нормальные» ФП с локальным минимумом плотности КЛ в МО. В 9 случаях  $b_2 < 0$ . Эти события (возрастание плотности КЛ) в меньшинстве, но они реальны.

Если  $b_2$  мало— это МО слабо влияет на КЛ около Земли.

## Влияние размеров МО на плотность КЛ



Влияние большинства МО на КЛ невелико:

из 74 событий в 41 это влияние  $<0.3\%$ , и в 50  $<0.5\%$ .

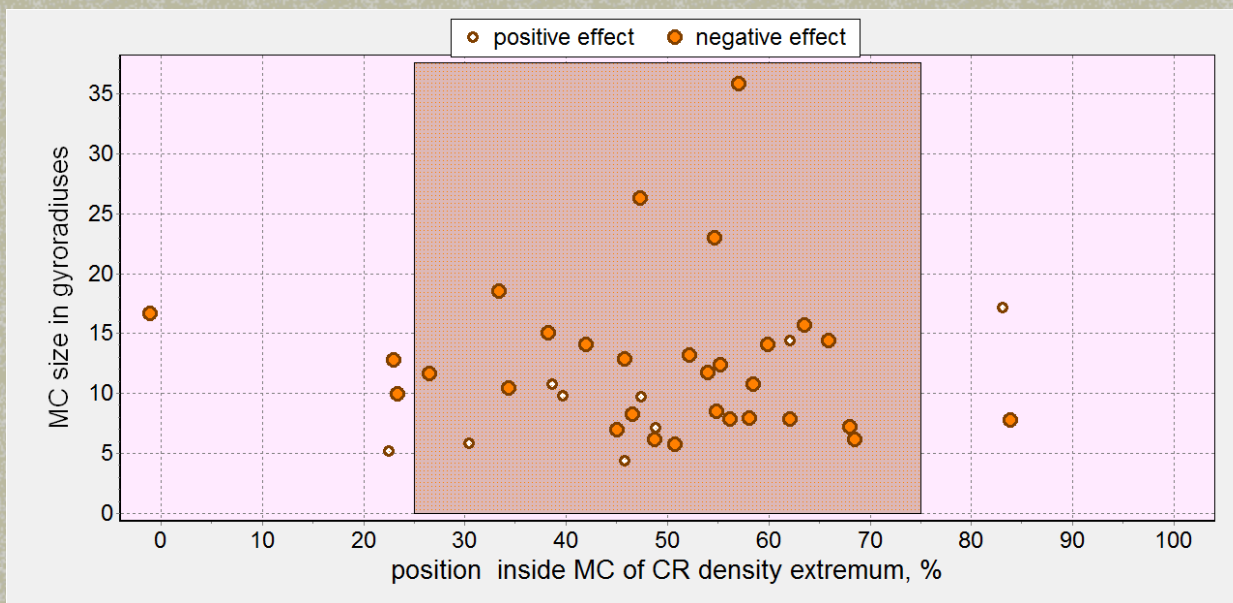
Такой малый эффект почти невозможно выделить по данным одного детектора.

ВСЕ СМЕ/ИСМЕ воздействуют на КЛ, особенно, когда у Земли наблюдается МО.

Однако эффекты СМЕ/ИСМЕ и магнитных облаков часто бывают малы и трудны для обнаружения.



## Положение экстремума плотности КЛ внутри МО



Разделим облако на центральную (25-75%) и боковые части. Из 39 событий в центральную попадает 33, а в боковые только 6. События с положительным эффектом имеют тах в ведущей части облака, а с отрицательным эффектом (min) имеют тенденцию группироваться в хвостовой части облака.



# Выводы

- 1) В большинстве случаев (но не во всех) поведение плотности КЛ в магнитном облаке у Земли можно описывать простой параболической зависимостью от расстояния от центра МО, измеренного в гирорадиусах.
- 2) Большинство магнитных облаков модулируют КЛ, уменьшая их плотность, но есть группа событий (приблизительно 1/5 часть), когда в МО плотность КЛ возрастает
- 3) Исследуя магнитные облака, удалось получить количественную связь вариаций плотности КЛ магнитосферного происхождения с изменениями Dst-индекса. Полученный коэффициент можно применять к вариациям плотности КЛ в любые периоды



## Выводы

- 4) Не наблюдается явной зависимости вклада вариаций плотности КЛ от  $B_{\max}$  внутри МО. Но все положительные эффекты наблюдались в слабом магнитном поле, а для  $B_{\max} > 18$  нТл все вариации плотности КЛ отрицательны
- 5) Экстремум (минимум или максимум) плотности КЛ чаще располагается ближе к центру облака, а не по его краям. События с положительным эффектом имеют максимум, в основном, в ведущей части облака. В событиях с отрицательным эффектом минимумы распределены более равномерно, но имеют тенденцию группироваться в хвостовой части облака.



**THANK  
YOU**





- The presence of MCs in the ICME significantly increases the ability of this disturbance to modulate CRs
- Even more explicitly, the MC affects the anisotropy of the CR. As a rule, vector anisotropy changes abruptly when the Earth enters and leaves a cloud and varies regularly inside the cloud.
- The behavior of cosmic rays inside the magnetic cloud reflects both its properties as a whole and features of its structure
- These changes (together with the data on the CR density)
- may provide additional information about the structure of
- magnetic cloud and its location relatively to Earth.