39 Всероссийская конференция по космическим лучам

Возможность прогнозирования экстремальной границы проникновения солнечных космических лучей в магнитосферу Земли во время магнитной бури.

Мягкова И.Н., Богомолов А.В.

[1]НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

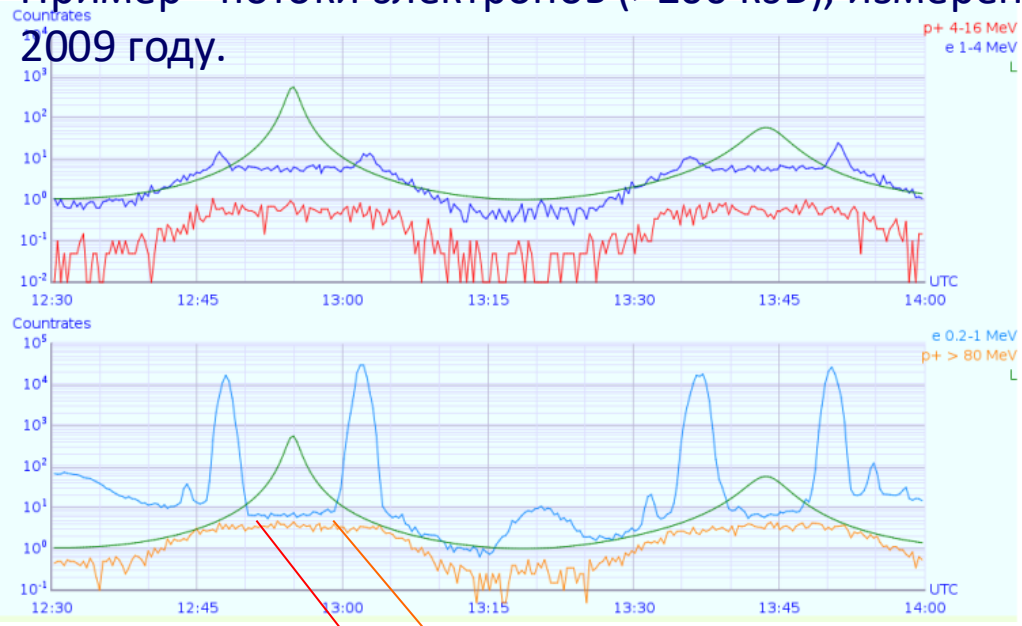
[2]Физических факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

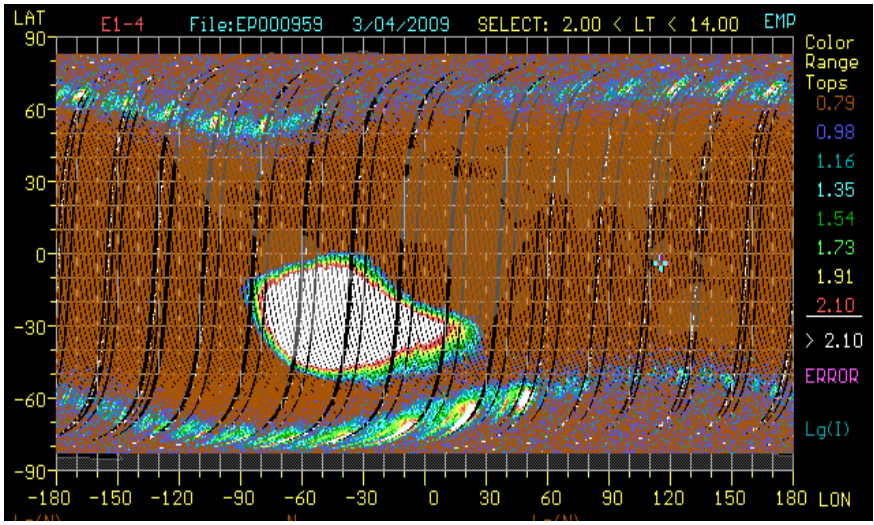
irina@srd.sinp.msu.ru

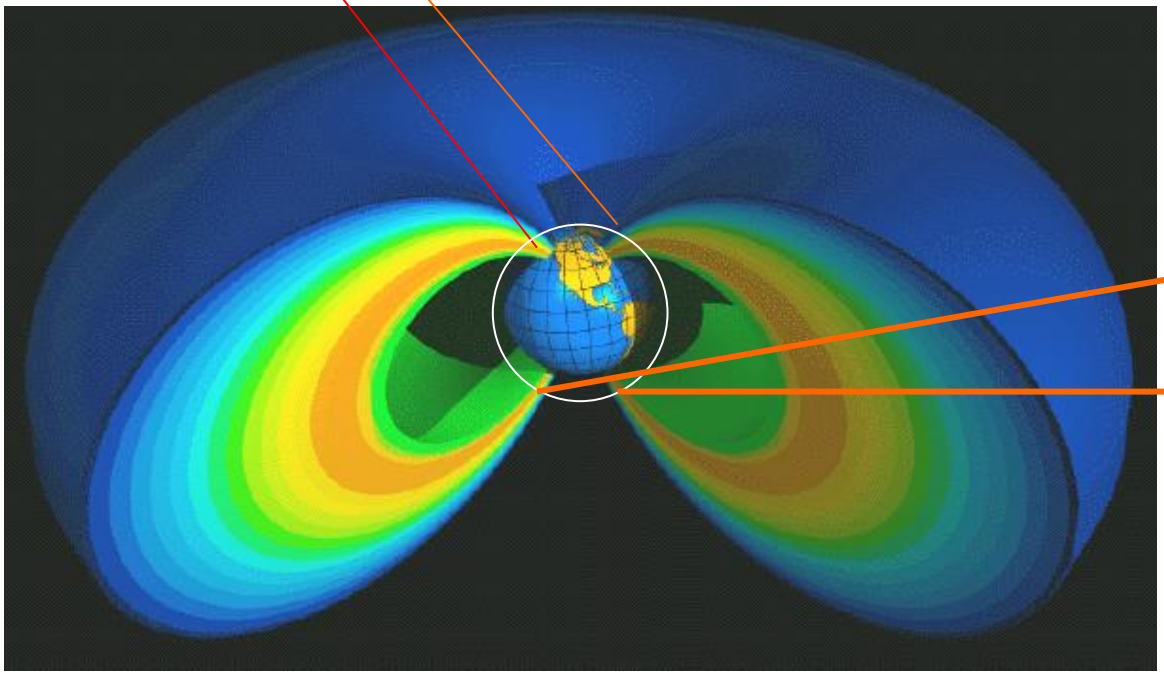
Прогнозирование радиационных условий на полярных орбитах представляет собой отдельную непростую задачу, поскольку в отличие от геостационарных орбит последствия разных явлений космической погоды проявляются по-разному на разных участках таких орбит.

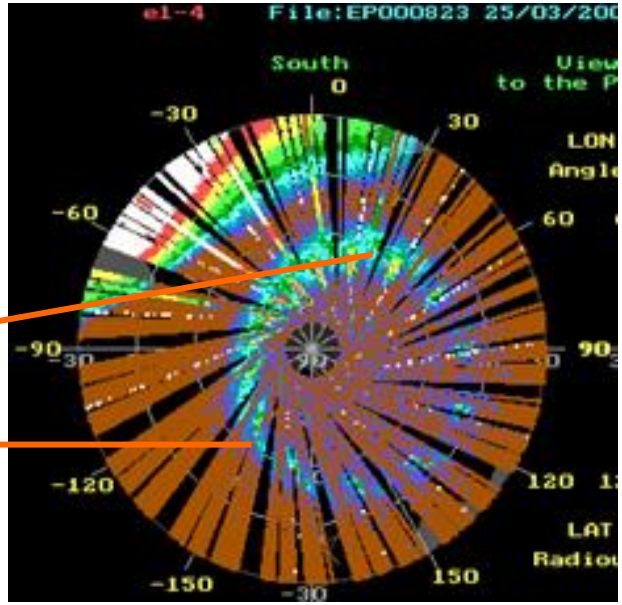
Рассмотрим краткосрочное прогнозирование положения экстремальной границы проникновения СКЛ (горизонт от 1 до 3 часов) на основе эмпирической зависимости полученной в эксперименте на ИСЗ «КОРОНАС-Ф».

Пример - потоки электронов (>200 кэВ), измеренные на борту спутника КОРОНАС-Фотон в 2009 году.





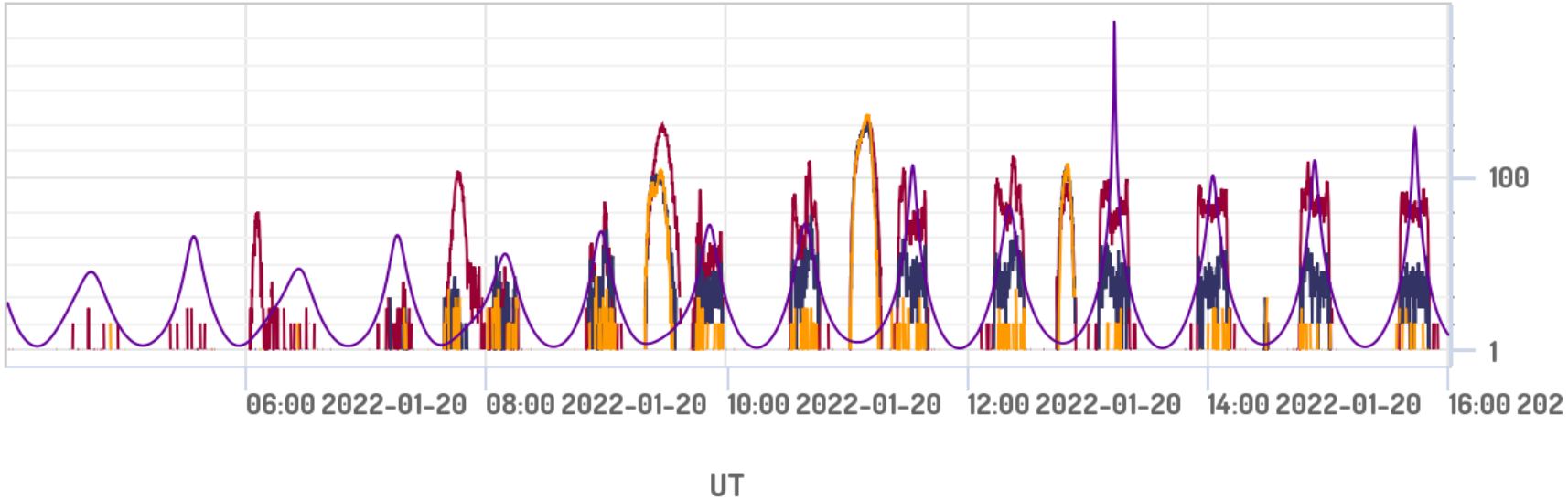




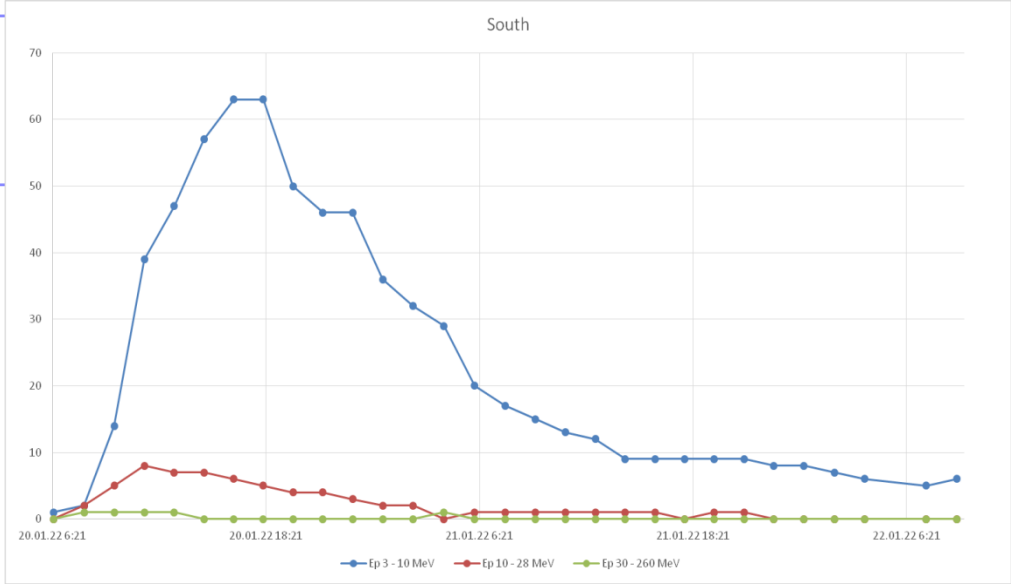
Какие проявления космической погоды невозможно корректно измерить в экспериментах на геостационарной орбите ?

1. Потоки и спектры электронов солнечных космических лучей.
2. Потоки протонов СКЛ с энергиями меньше 10 МэВ вблизи Земли.
3. **Границы проникновения солнечных космических лучей (как протонов, так и электронов) в магнитосферу Земли.**
4. Вариации потоков электронов внешнего РПЗ на низких высотах.

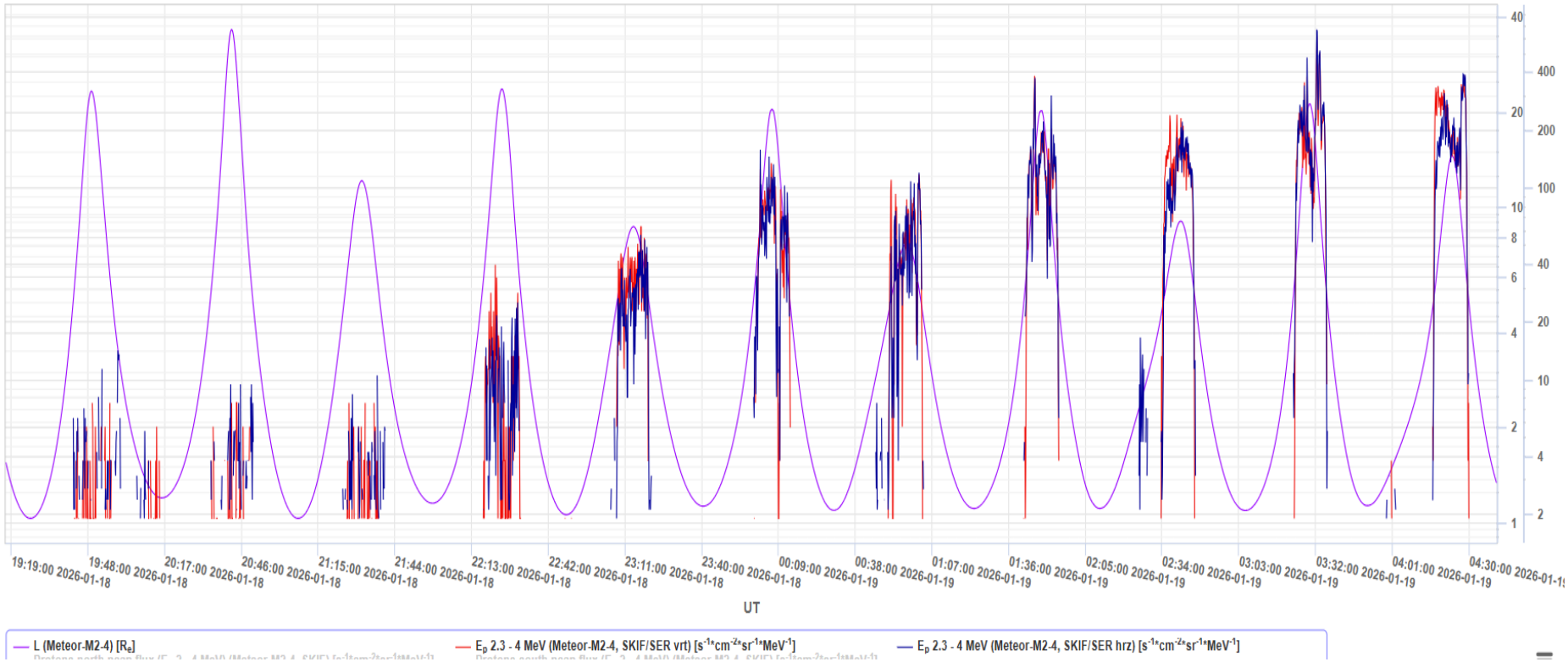
Потоки протонов СКЛ на ИСЗ «Метеор»



E_p 3 - 10 MeV(DAS4 vrt) (Meteor M2, SKL) [$cm^{-2}\cdot s^{-1}\cdot sr^{-1}$]
E_p 10 - 28 MeV(DAS4 vrt) (Meteor M2, SKL) [$cm^{-2}\cdot s^{-1}\cdot sr^{-1}$]
E_p 30 - 260 MeV(DAS4 vrt) (Meteor M2, SKL) [$cm^{-2}\cdot s^{-1}\cdot sr^{-1}$]
L (Meteor M2) [R_e]

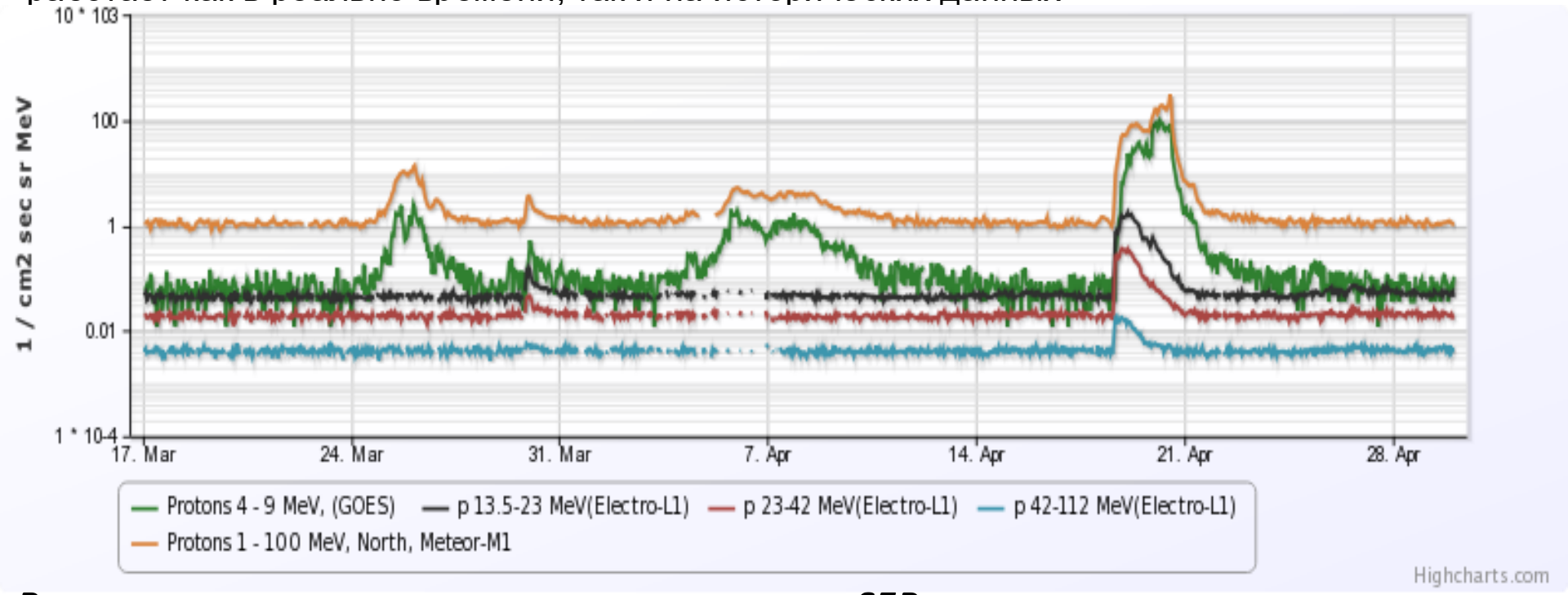


Возрастания потоков протонов СКЛ в полярных шапках с 18 января 2026



Автоматическое разделение данных о потоке заряженных частиц, измеренных на борту низкоорбитальных космических аппаратов, осуществляется на основе L (координаты МакИлвайна) и географических координат спутников. Это позволяет осуществлять мониторинг в реальном времени, оперативно сравнивая эти данные низких полярных орбит с данными других космических аппаратов.

В НИИЯФ МГУ была создана система оперативного мониторинга радиационного состояния околоземного комического пространства по данным экспериментов на ИСЗ с круговыми полярными орбитами. Данная система основана на автоматическом разделении потоков заряженных частиц в зависимости от координат их регистрации и работает как в реально времени, так и на исторических данных

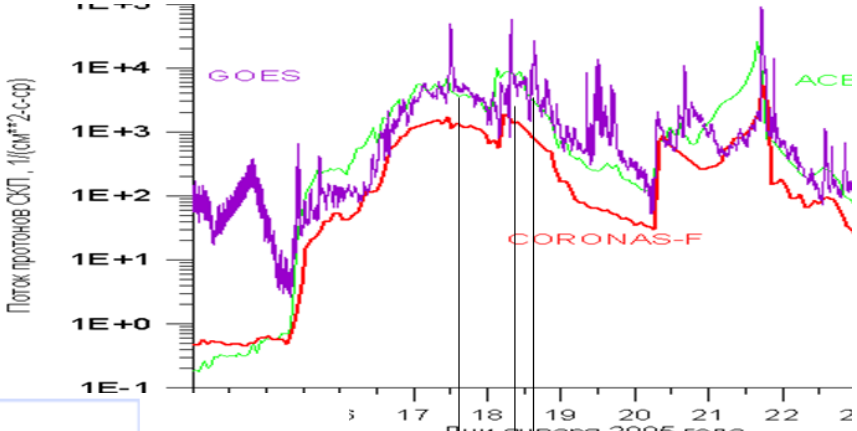


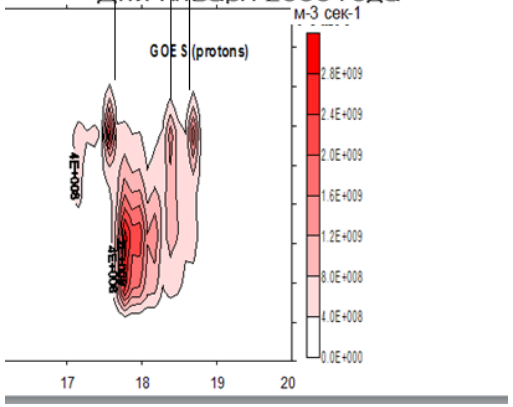
Временные зависимости потока протонов SEP, измеренные в экспериментах на борту спутников «Метеор-М № 1» (результат работы системы), GOES и «Электро-Л» с 27 марта по 28 апреля 2014 года.

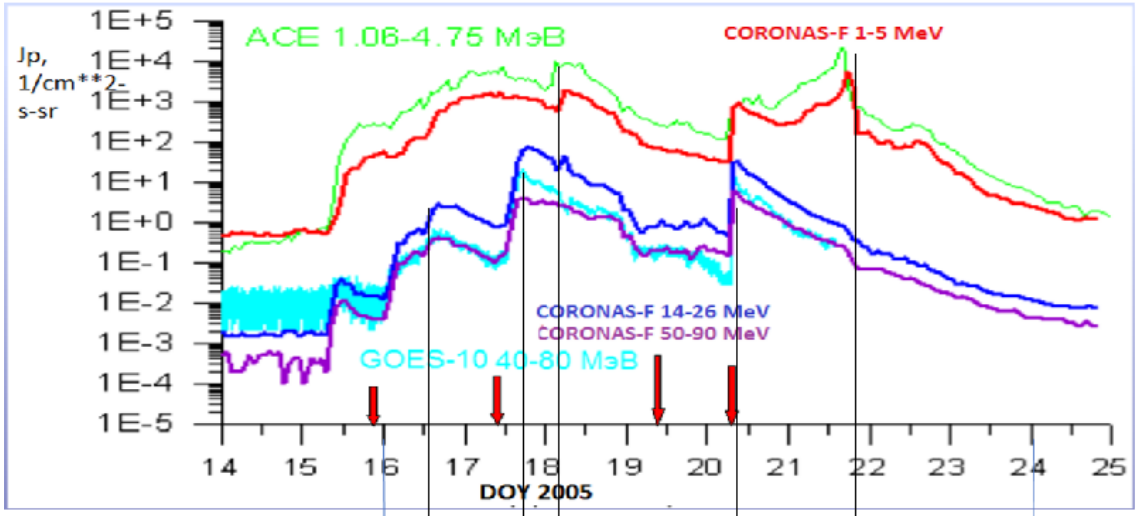
Для чего необходимо знать границы проникновения СКЛ ?

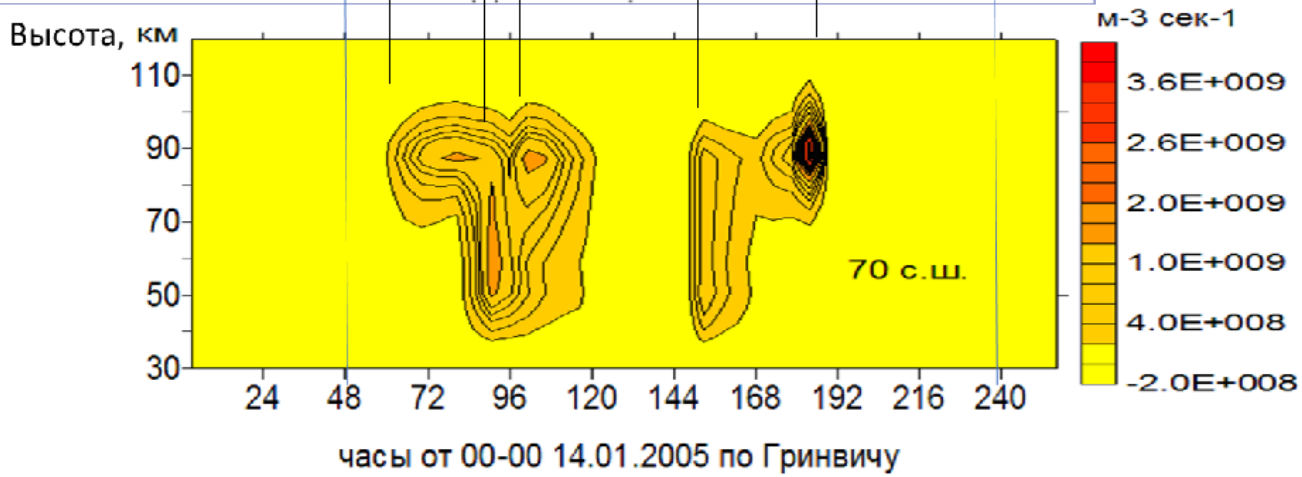
Одним из наиболее важных прикладных вопросов - это расчет ионизации верхней атмосферы солнечными космическими лучами. В случае когда во время большого потока СКЛ происходит магнитная буря, то на главной фазе бури происходит существенное увеличение области, куда приходят потоки СКЛ

Корректный расчет ионизации от протонов СКЛ с энергией 1-10 МэВ невозможен по данным с геостационарной орбиты, следует использовать данные экспериментов на низкой полярной орбите

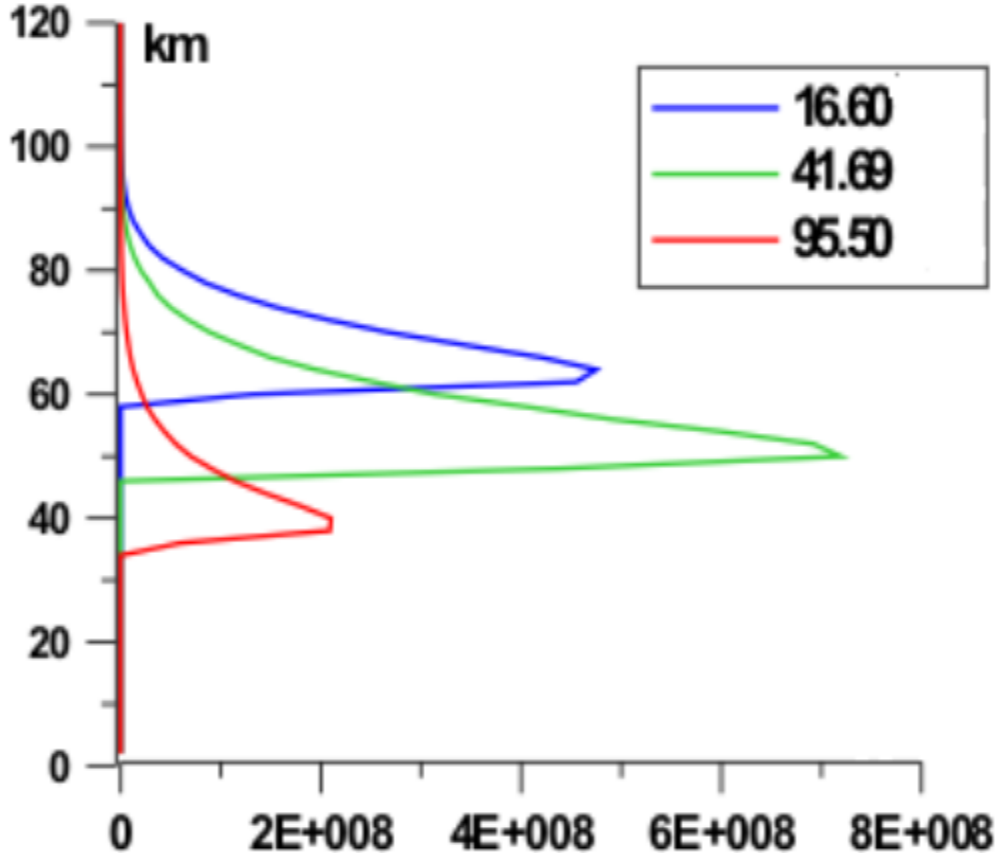






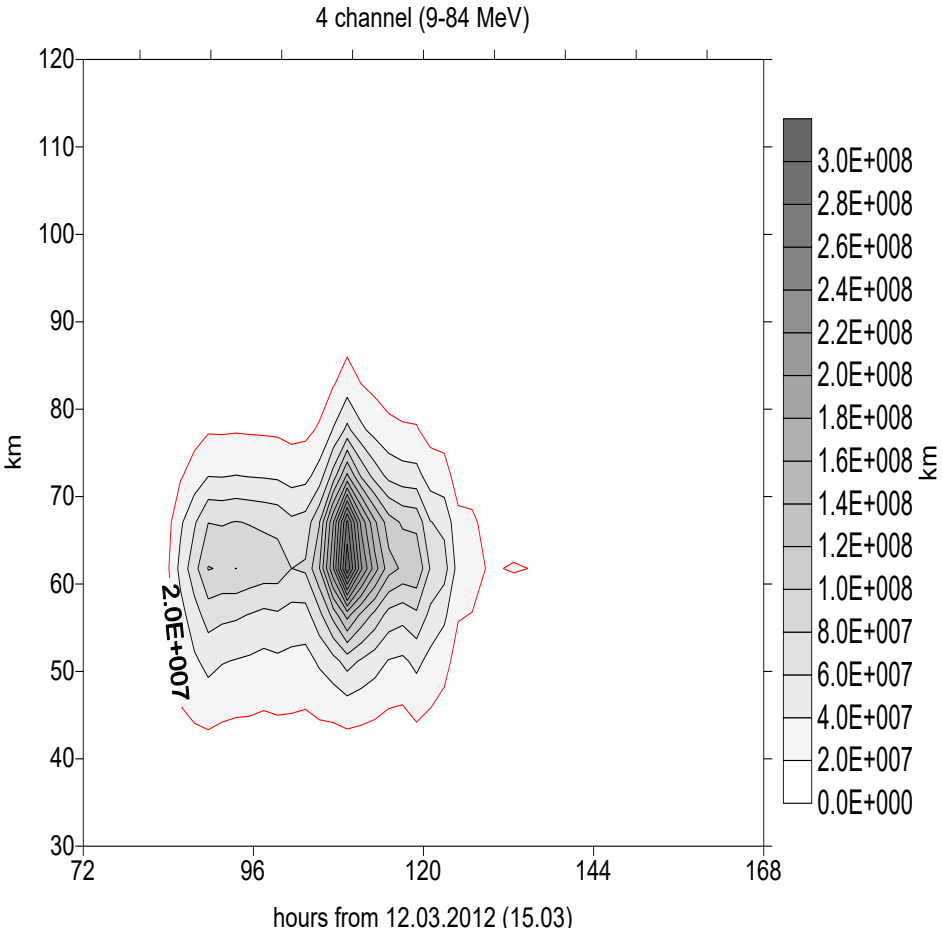


Скорости ионизации атмосферы (частиц на кубический метр в секунду) , обусловленные торможением солнечных протонов различных энергий (МэВ) в высоких широтах северного полушария

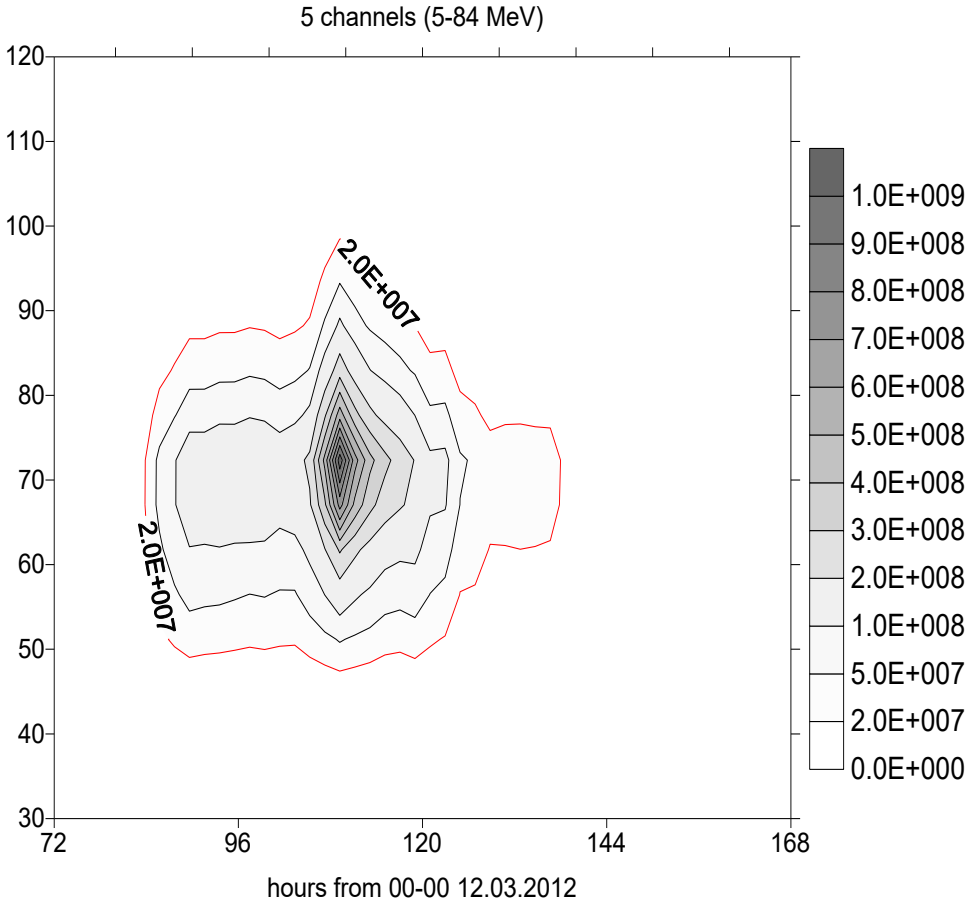


Сравнение результатов расчетов ионизации по данным GOES для разной граничной энергии

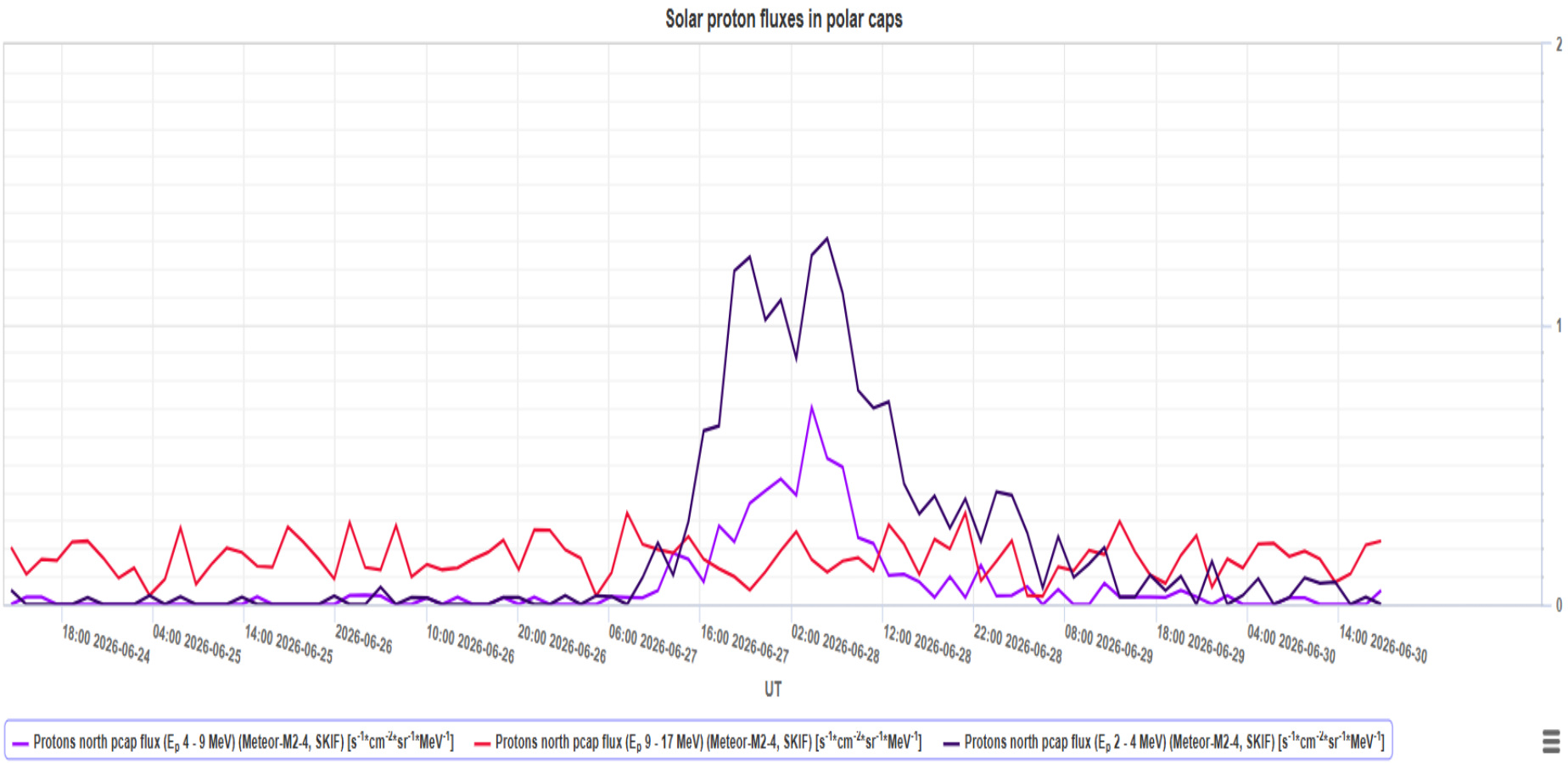
4 канала: 9_15MeV, 15-40MeV, 38-82MeV, 84-200MeV



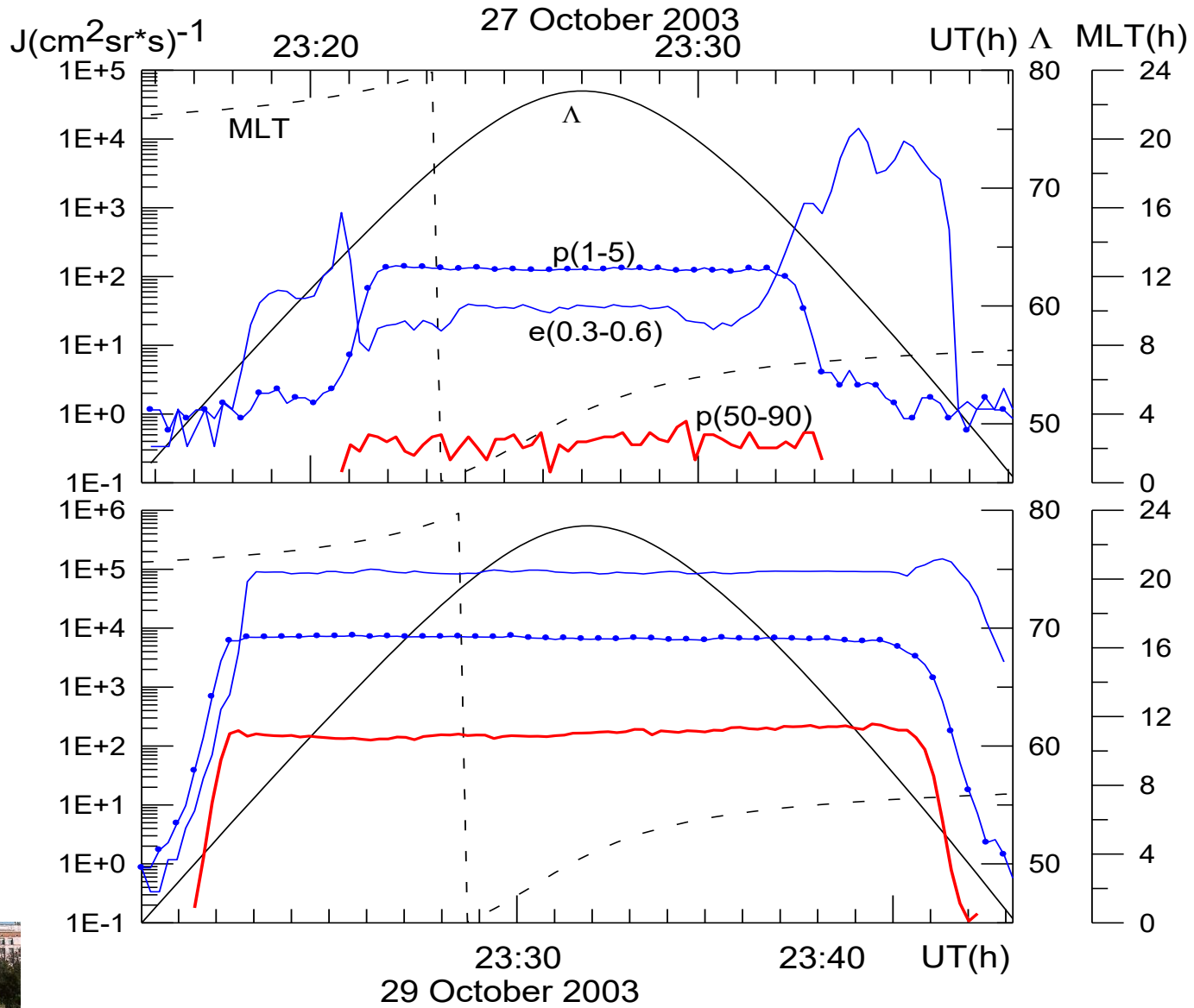
5 каналов: 5-9 МэВ, 9_15MeV 15-40MeV 38-82MeV, 84-200MeV.



Потоки протонов солнечных космических лучей по данным ИСЗ «Метеор- М2-4» - https://swx.sinp.msu.ru/weather.php



Изменения границ проникновения солнечных энергетических частиц в магнитосферу Земли во время магнитных бурь — существенное явление космической погоды.

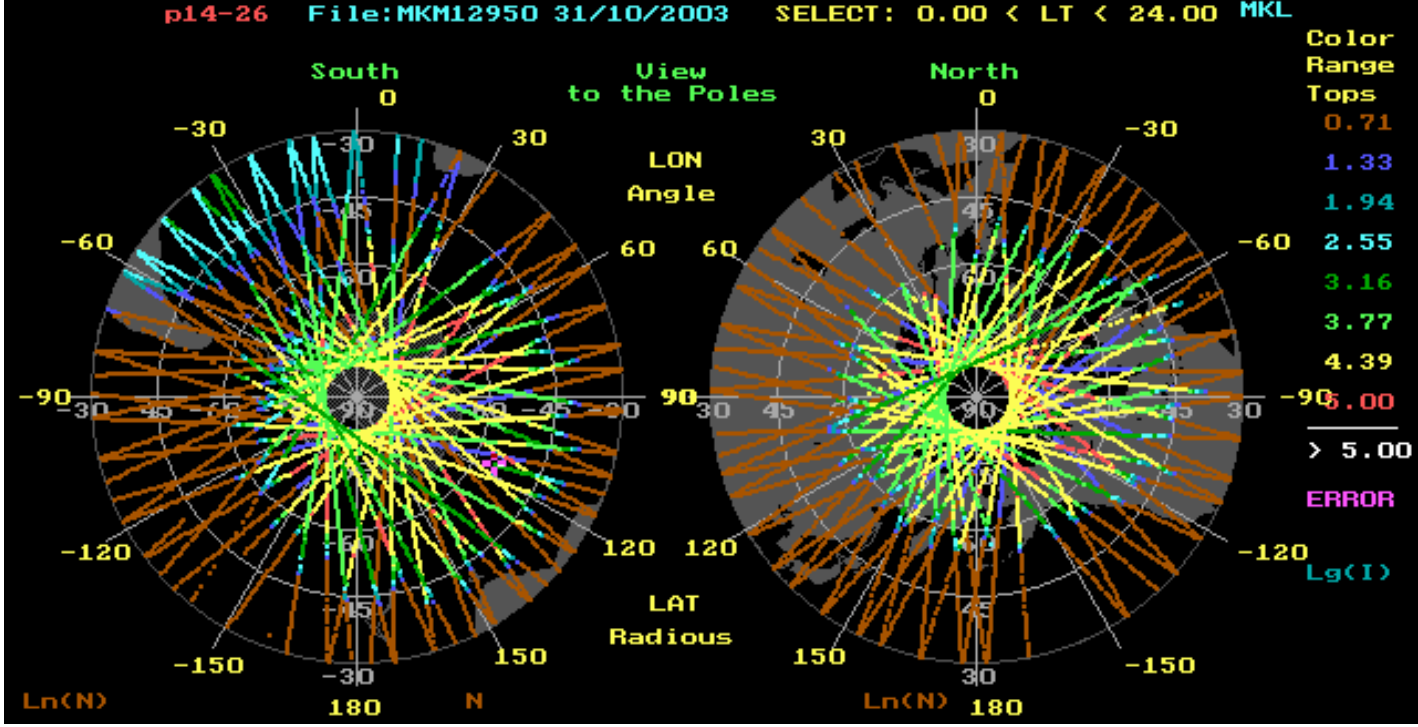


L = 1/cos**2 Λ).

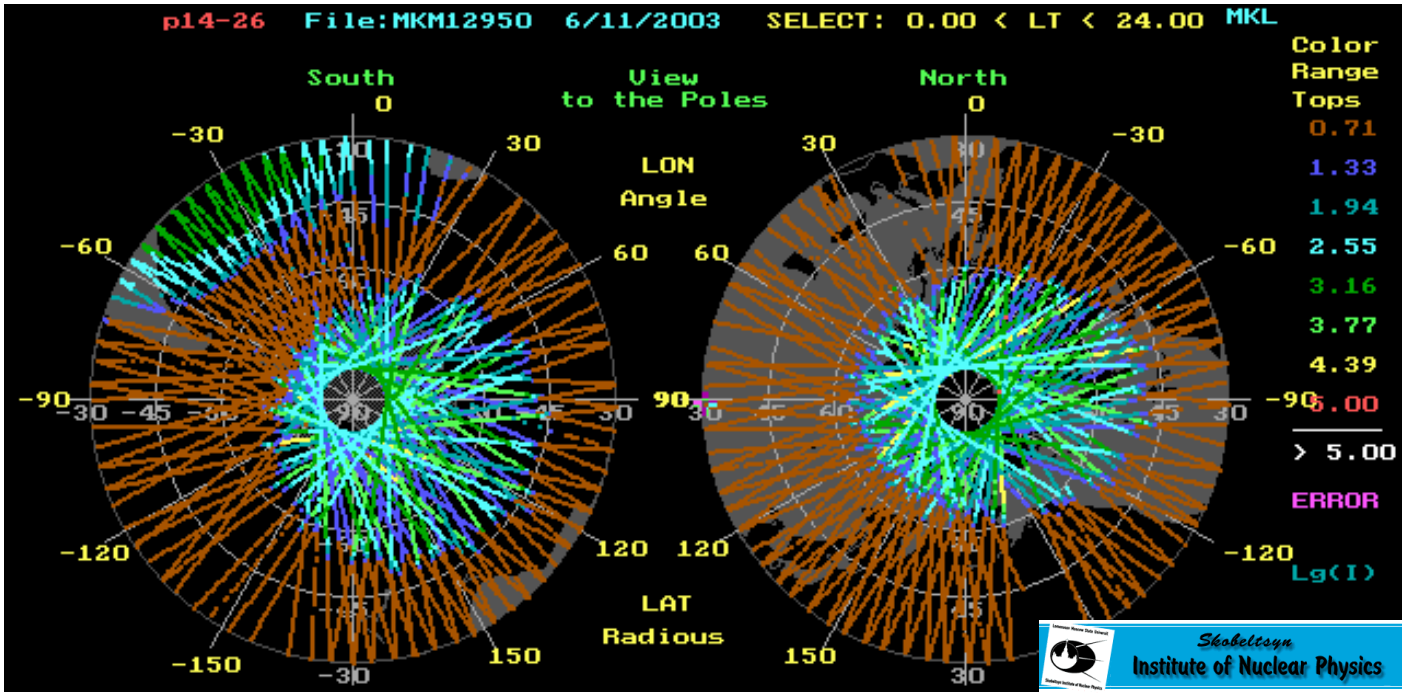
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics
Lomonosov Moscow State University

View to Poles

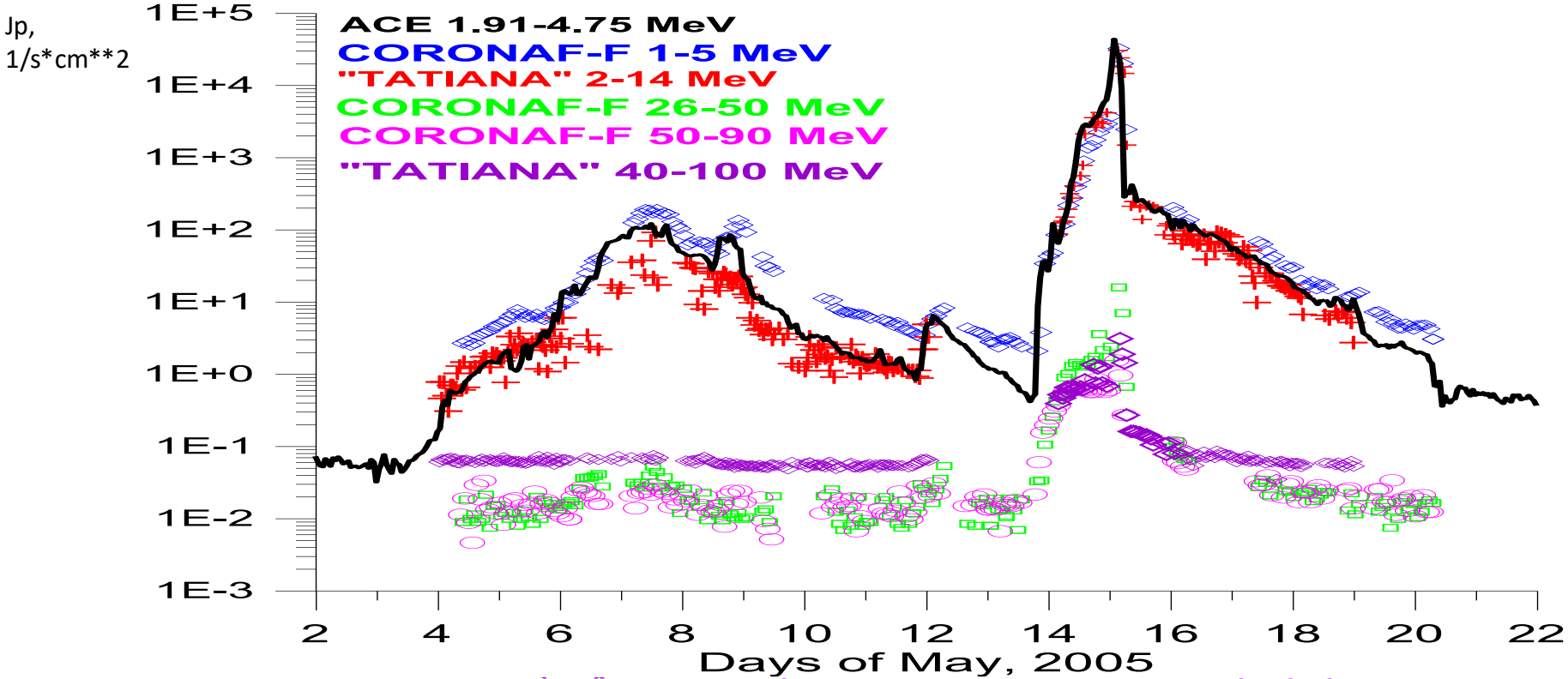
28-
30 /10/03

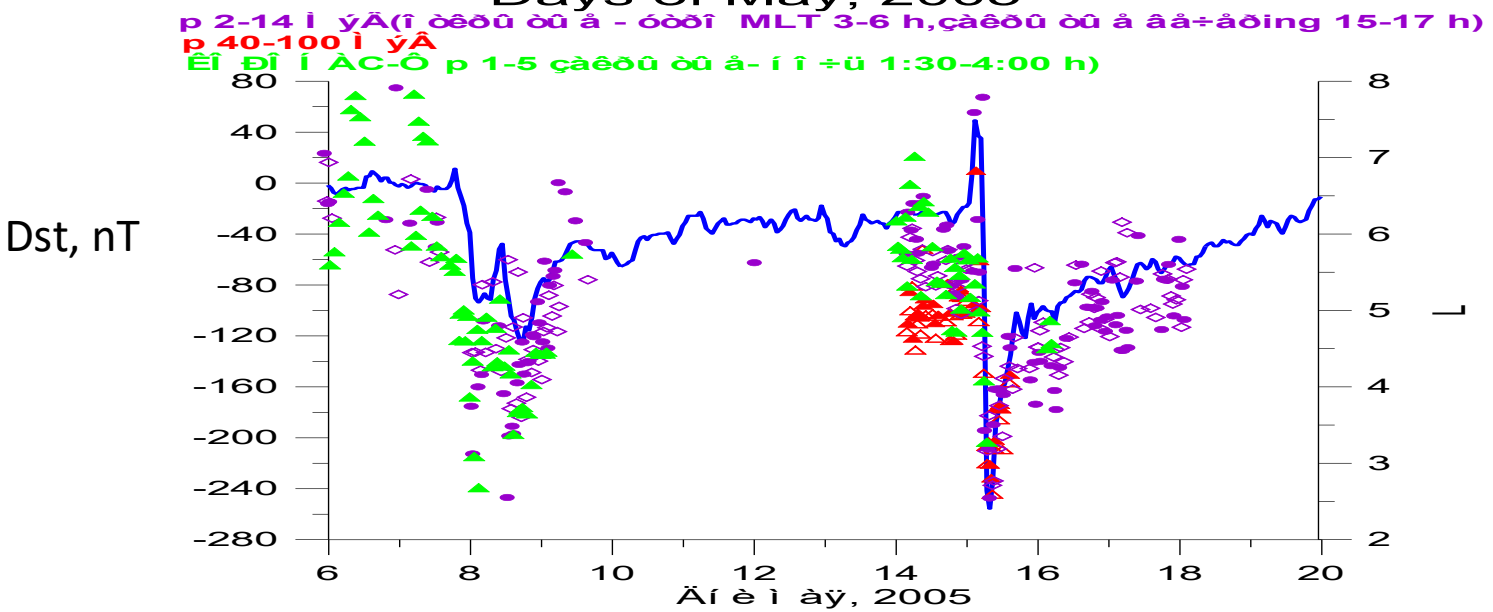


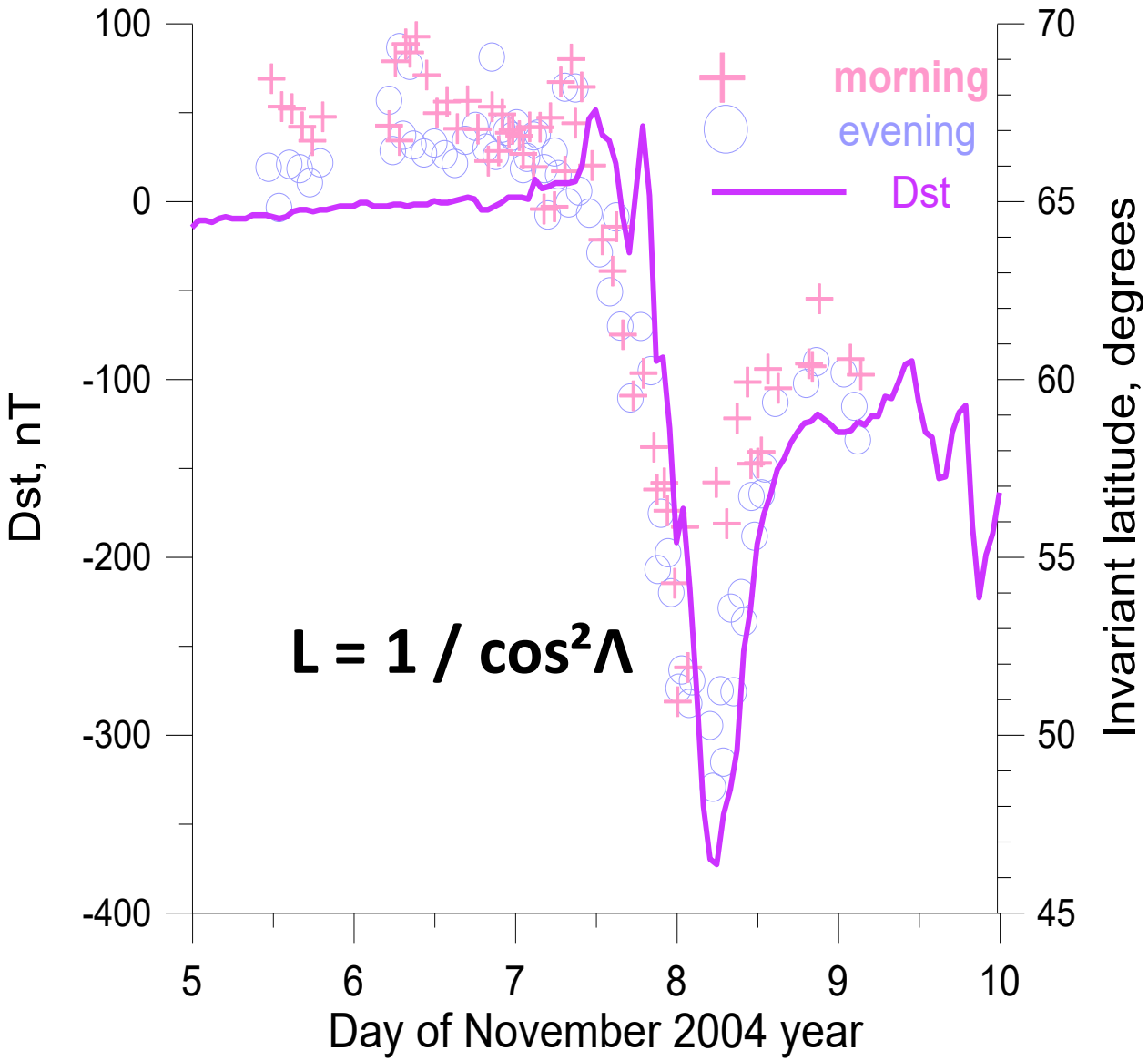
01-
05/11/03



Skobeltsyn
Institute of Nuclear Physics
Lomonosov Moscow State University


Jp,
1/s*cm**2
ACE 1.91-4.75 MeV
CORONAF-F 1-5 MeV
"TATIANA" 2-14 MeV
CORONAF-F 26-50 MeV
CORONAF-F 50-90 MeV
"TATIANA" 40-100 MeV
1E+5
1E+4
1E+3
1E+2
1E+1
1E+0
1E-1
1E-2
1E-3
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
Days of May, 2005


p 2-14 Ì ýÄ(î òêðû òû å - óòðî MLT 3-6 h,çàêðû òû å âå÷åðing 15-17 h)
p 40-100 Ì ýÂ
ÊÎ ÐÎ Í ÀC-Ô p 1-5 çàêðû òû å- í î ÷ü 1:30-4:00 h)
Dst, nT
80
40
0
-40
-80
-120
-160
-200
-240
-280
8
7
6
5
4
3
2
L
6
8
10
12
14
16
18
20
Äí è ì àÿ, 2005



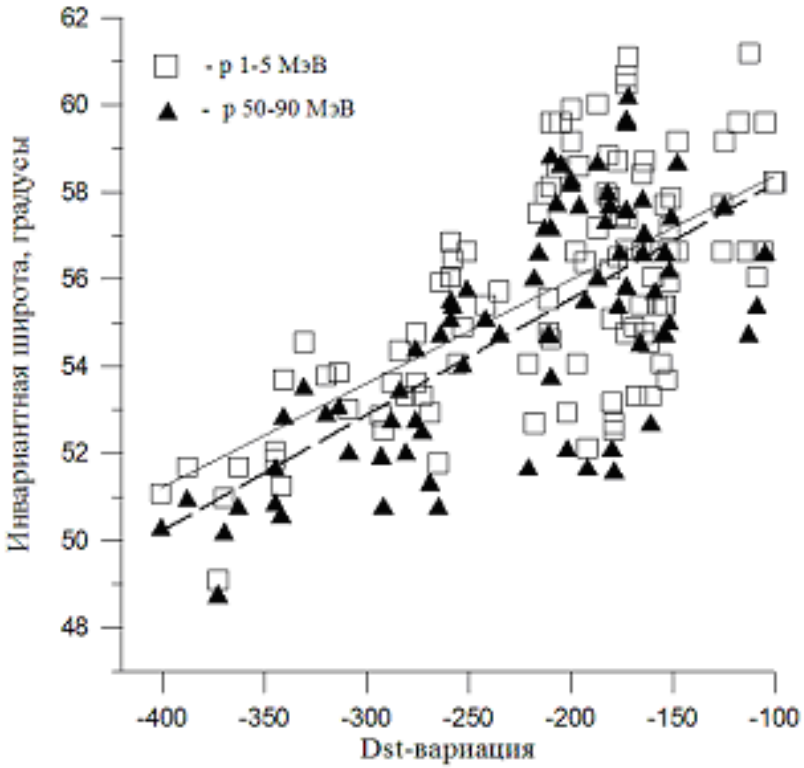
Экспериментально измеренные границы проникновения для протонов с энергией 1-5 МэВ с 5 по 10 ноября 2004 г. и Dst- индекс. Инвариантная широта (обозначается как Λ, или инвариантная геомагнитная широта) — это геомагнитная широта на поверхности Земли, соответствующая силовой линии магнитного поля с заданным значением параметра дрейфовой оболочки L.

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics
Lomonosov Moscow State University

Была создана эмпирическая модель, позволяющая определять экстремальное значение положения границы проникновения протонов СКЛ в магнитосферу Земли в вечерне-ночном секторе:

Lat (inv)*=A+B*Dts+C*Kp , где A=64.5, B=0.015, C=-0.86 для протонов с энергией 1-5 МэВ и где A= 65.03 B=0.016, C=-0 .94 В основу модели легли данные, полученных в эксперименте КОРОНАС-Ф во время сильных и средних магнитных бурь 2001 – 2005 гг.

[*И. Н. Мягкова, А. В. Богомолов, Б. Ю. Юшков, К. Кудела. Исследование экстремальных значений положения границы проникновения протонов СКЛ в магнитосферу Земли во время магнитных бурь 2001-2005 гг. Известия РАН, 73(3):339–341, 2009*]



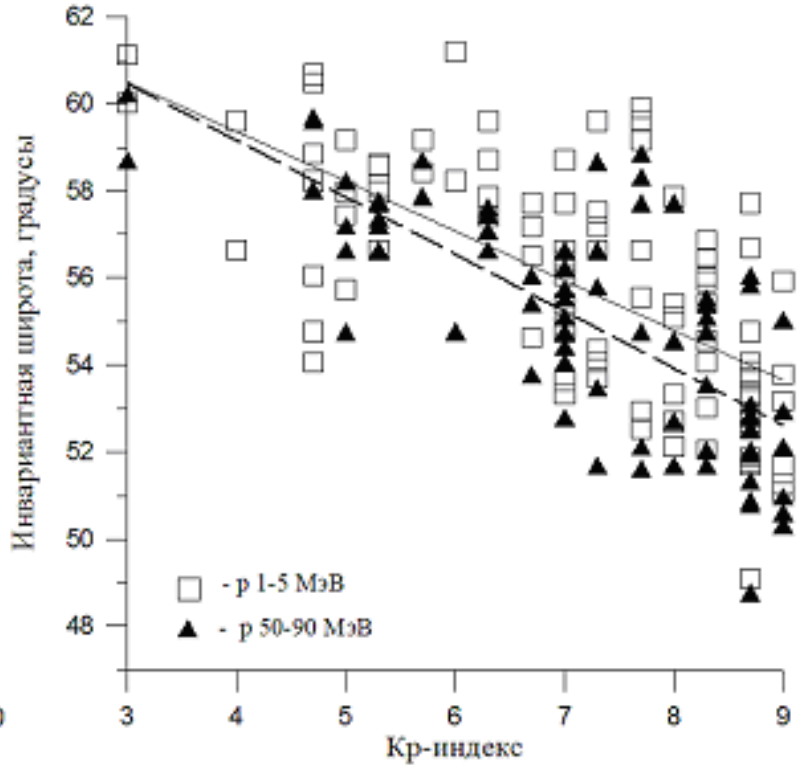


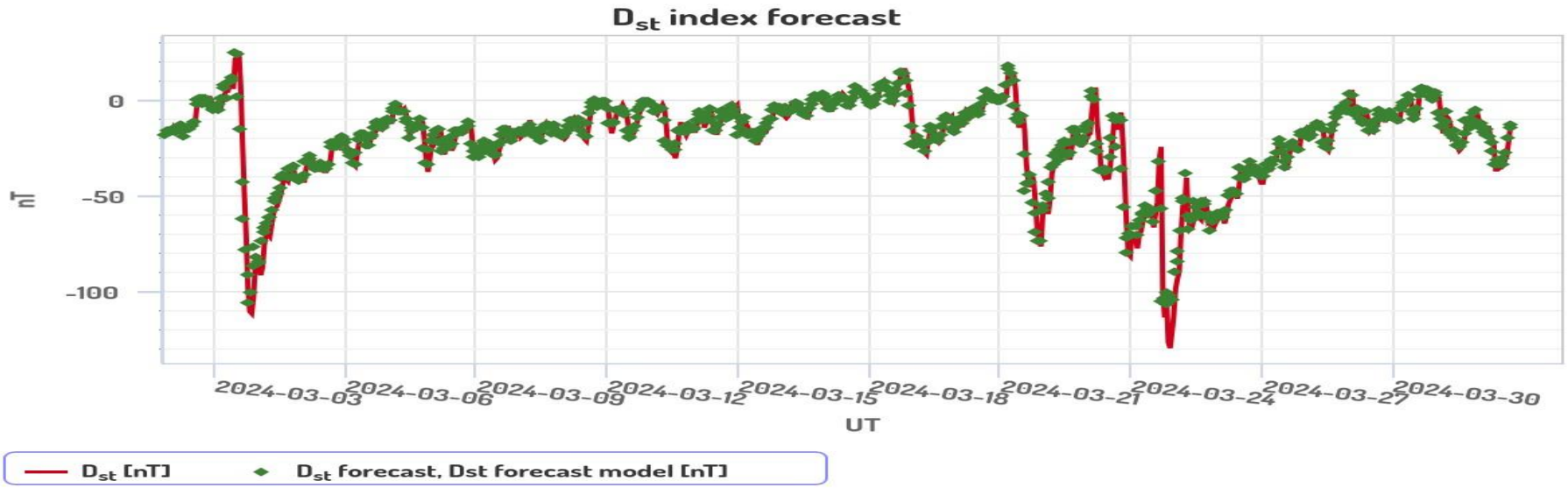
Table 1. Correlation coefficients and parameters of linear regression dependence on Dst and K_p

	(1–5)-MeV protons (105 events)			(50–90)-MeV protons (78 events)		
	R_{cor}	a	b	R_{cor}	c	d
Dst	0.65	60.8 ± 0.6	0.024 ± 0.003	0.7	60.9 ± 0.7	0.027 ± 0.003
K_p	–0.66	63.6 ± 0.9	-1.11 ± 0.13	–0.74	64.7 ± 1.0	-1.4 ± 0.14

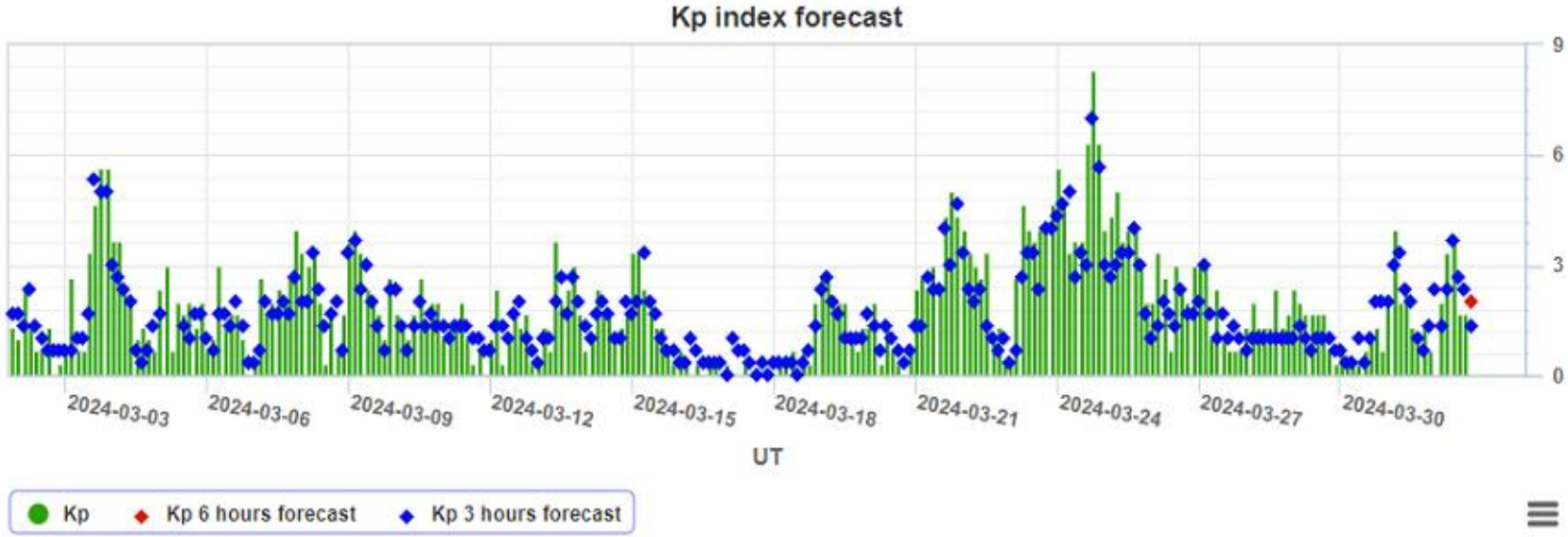
Table 2. Multiple correlation coefficients and parameters of multiple linear regression dependence

	R_{cor}	A	B	C	N
(1–5)-MeV protons	0.74	64.1 ± 0.8	0.015 ± 0.003	-0.72 ± 0.14	105
(50–90)-MeV protons	0.82	65.3 ± 0.9	0.016 ± 0.003	-0.94 ± 0.15	78

Примеры прогнозирования Dst и Kp индексов.

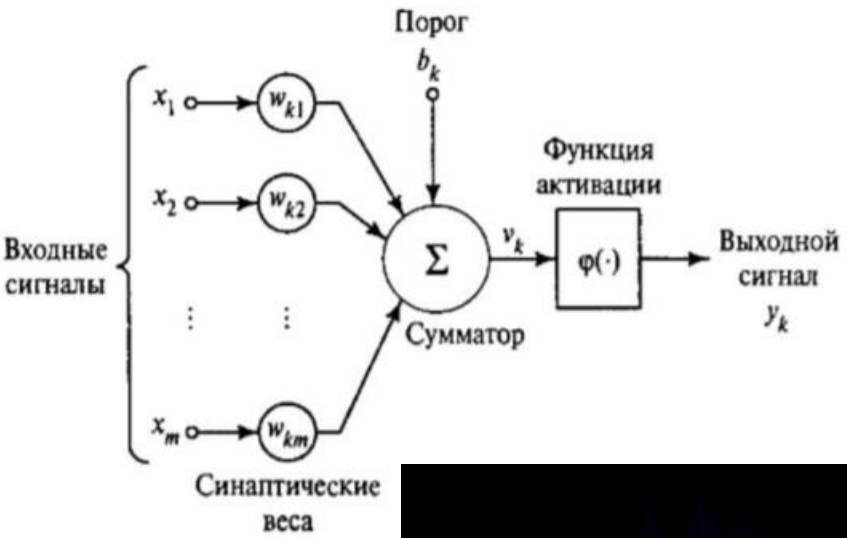


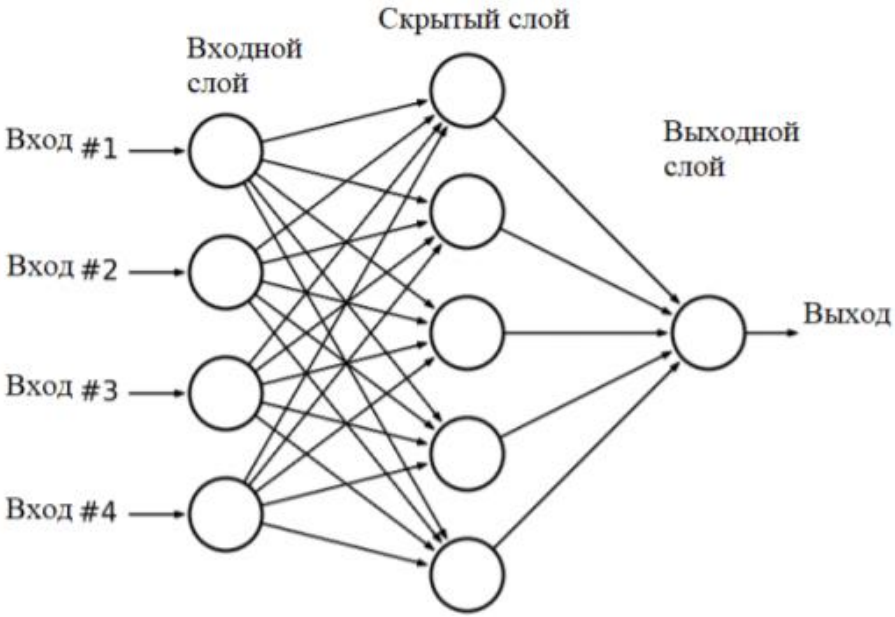
https://swx.sinp.msu.ru/models/kp.php?gcm=1



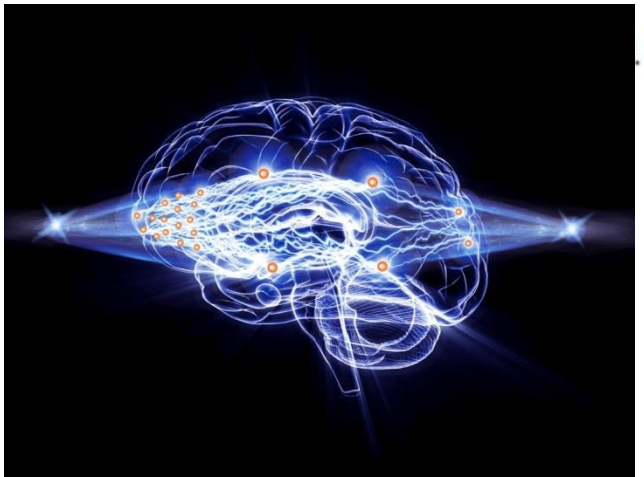
Схемы искусственного нейрона и многослойного персептрона

Искусственный нейрон



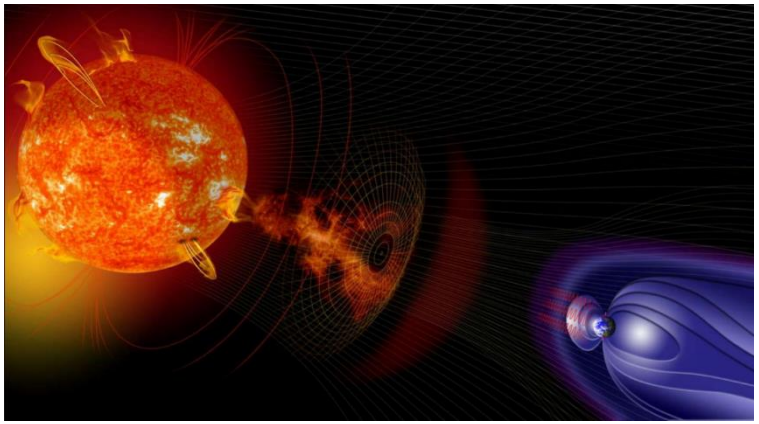


. *Модель персептрона с одним скрытым слоем*



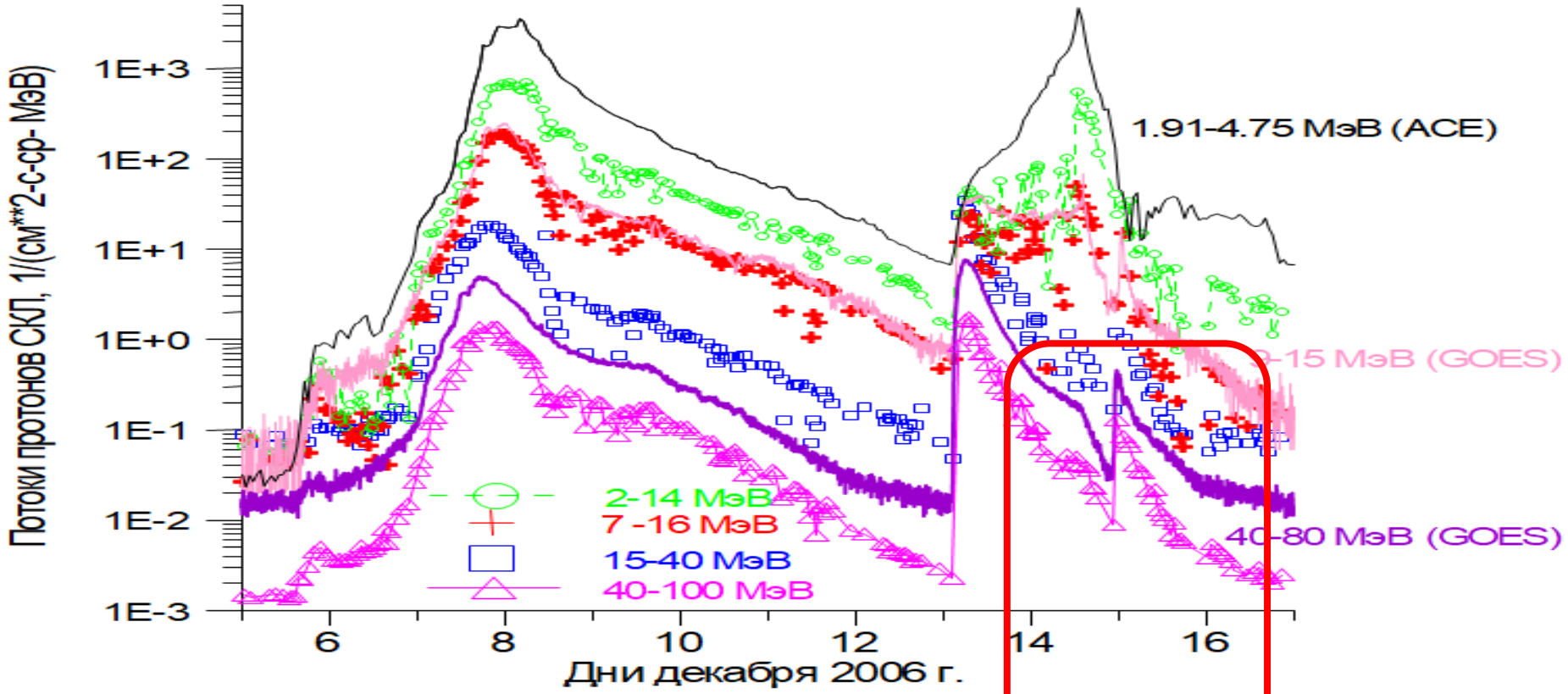
Магнитосфера Земли как динамическая система

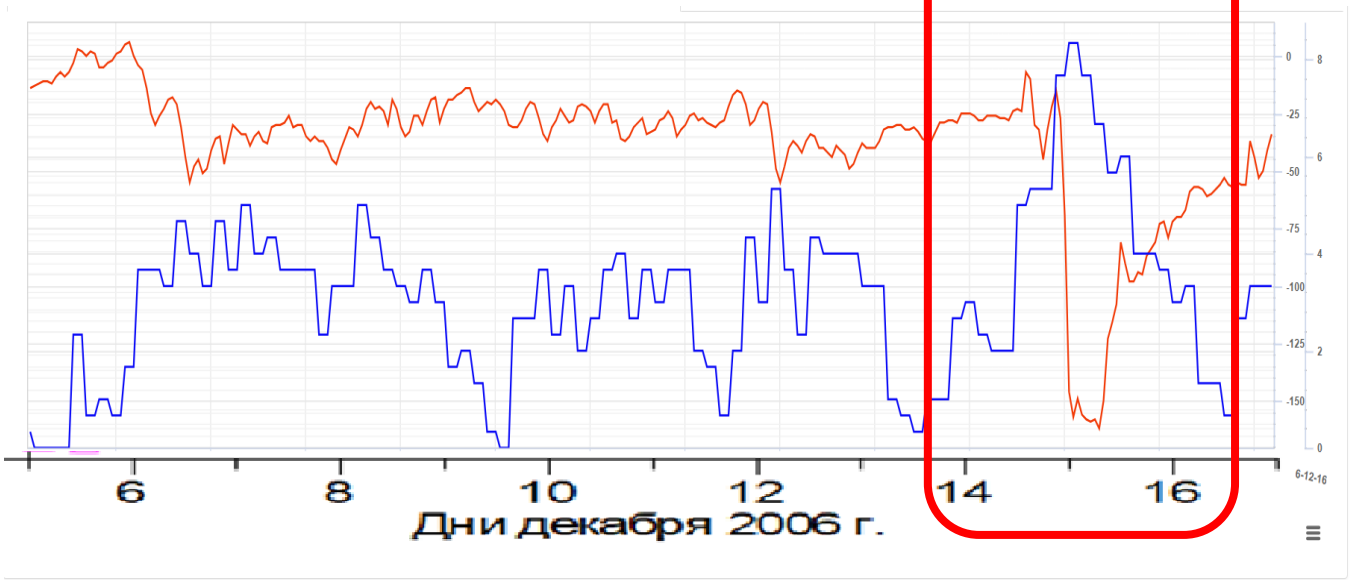
Состояние магнитосферы Земли и внешнее воздействие на неё *могут быть описаны* следующими физическими величинами:



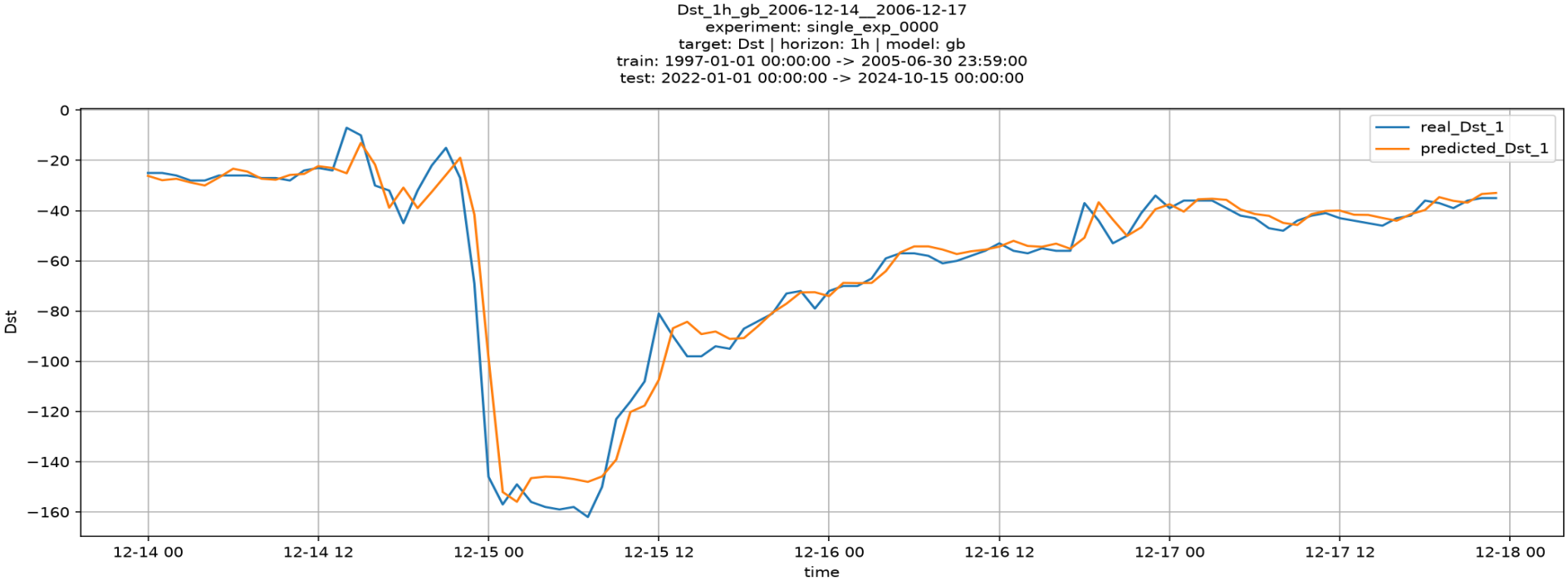
- **Геомагнитные индексы: Dst, Kp, Ap, AE**
- **Параметры солнечного ветра (СВ): скорость V, плотность n_p, температура T**
- **Параметры межпланетного магнитного поля (ММП): Bx, By, Bz, |B|**
- *Потоки релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли (РЭ ВРПЗ) на геостационарной орбите*
- **Фазы вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца**
- Прогноз скорости СВ по площади корональных дыр на изображениях Солнца
- *Информация о наличии коронального выброса массы (КВМ)*
- *Данные о числе солнечных пятен*
- *Специальные физически обоснованные функции, эффективно описывающие передачу энергии от СВ в магнитосферу (coupling functions)*

Прогнозирование **Dst-индекса**

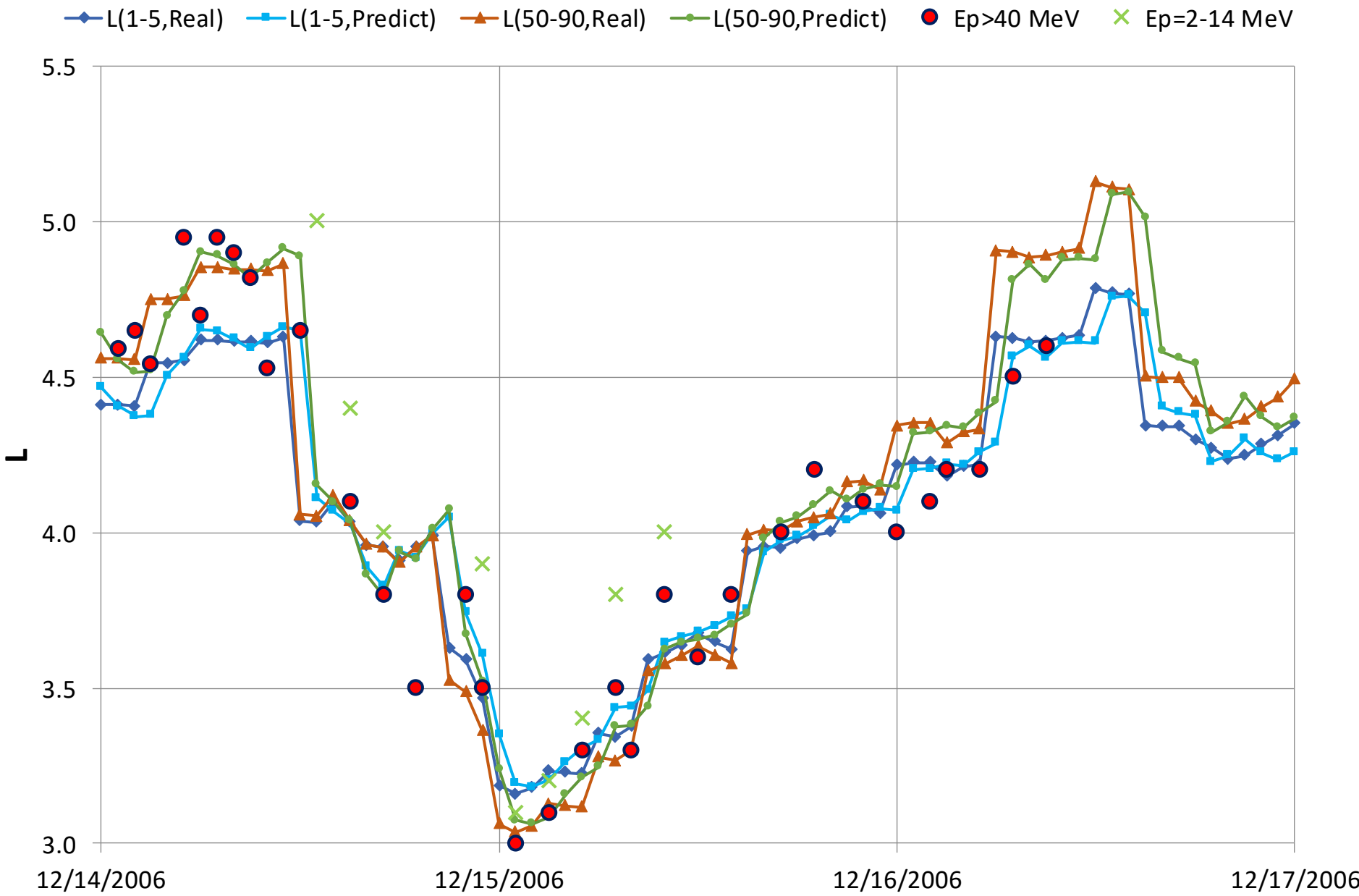

Потоки протонов СКП, 1/(см**2-с-ср-МэВ)
1E+3
1E+2
1E+1
1E+0
1E-1
1E-2
1E-3
1.91-4.75 МэВ (ACE)
-15 МэВ (GOES)
40-80 МэВ (GOES)
2-14 МэВ
7 -16 МэВ
15-40 МэВ
40-100 МэВ
6
8
10
12
14
16
Дни декабря 2006 г.


6
8
10
12
14
16
Дни декабря 2006 г.

Прогнозирование Dst и Кр-индексов с 14 по 16.12. 2006

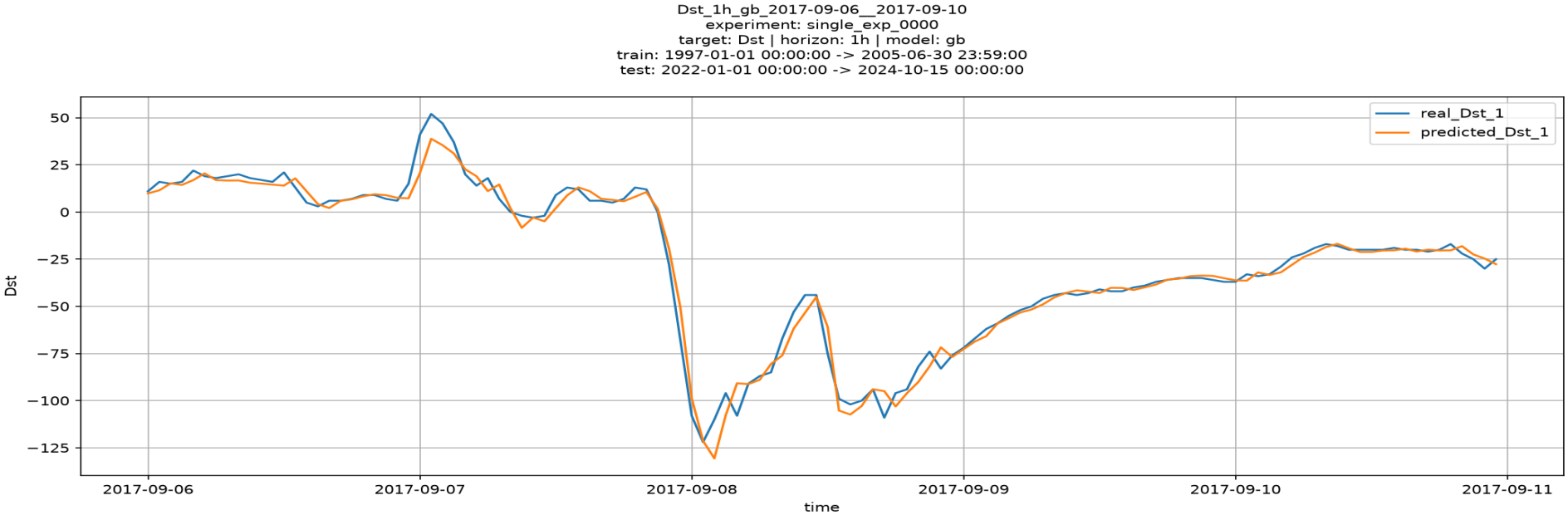


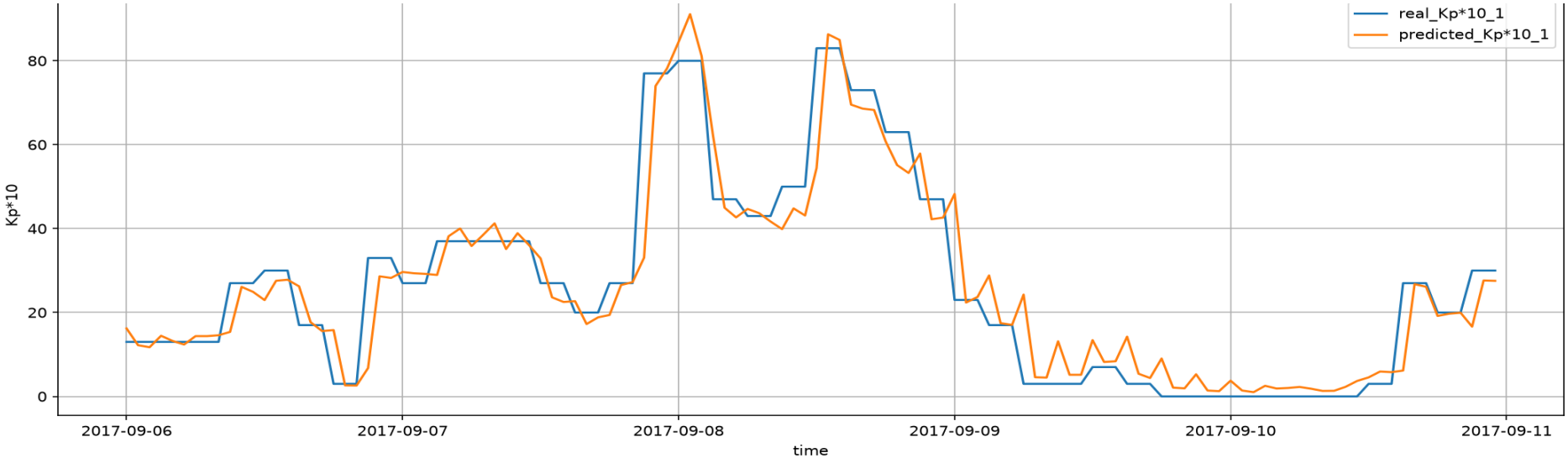
ГРАНИЦЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ ПРОТОНОВ СКЛ ВО ВРЕМЯ СПС 15-16 ДЕКАБРЯ 2006



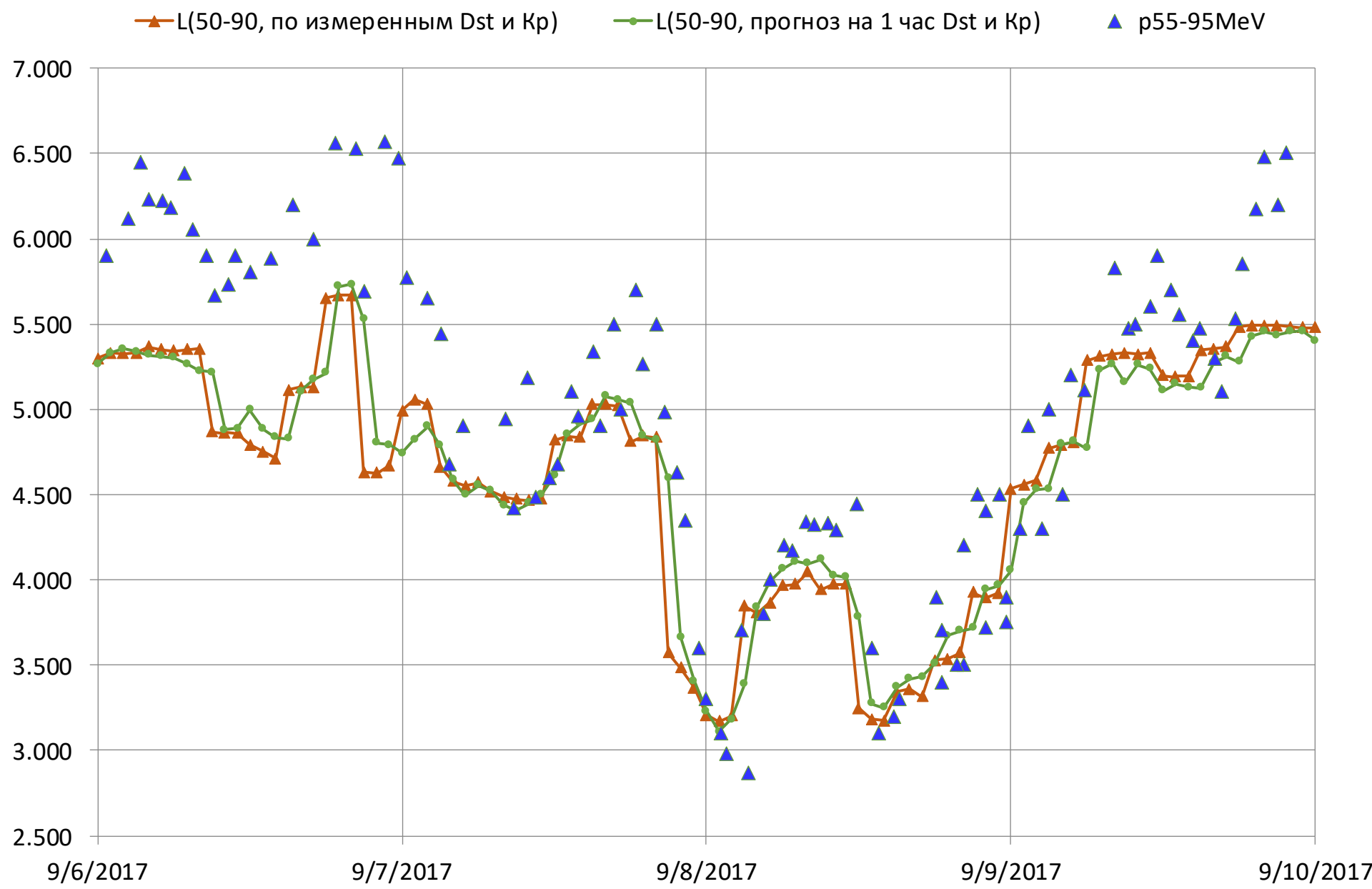
СЕРИЯ СПС 4-13.09.2017, магнитная буря – 7-9.09.2017

Прогнозирование Dst и Кр-индексов с 6 по 11.09. 2017





ГРАНИЦЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ ПРОТОНОВ СКЛ ВО ВРЕМЯ СПС 6-9 СЕНТЯБРЯ 2017



Заключение

Современные методы прогнозирования и накопленные экспериментальные данные позволяют прогнозировать радиационную обстановку на низких полярных орбитах (LEO), а именно –

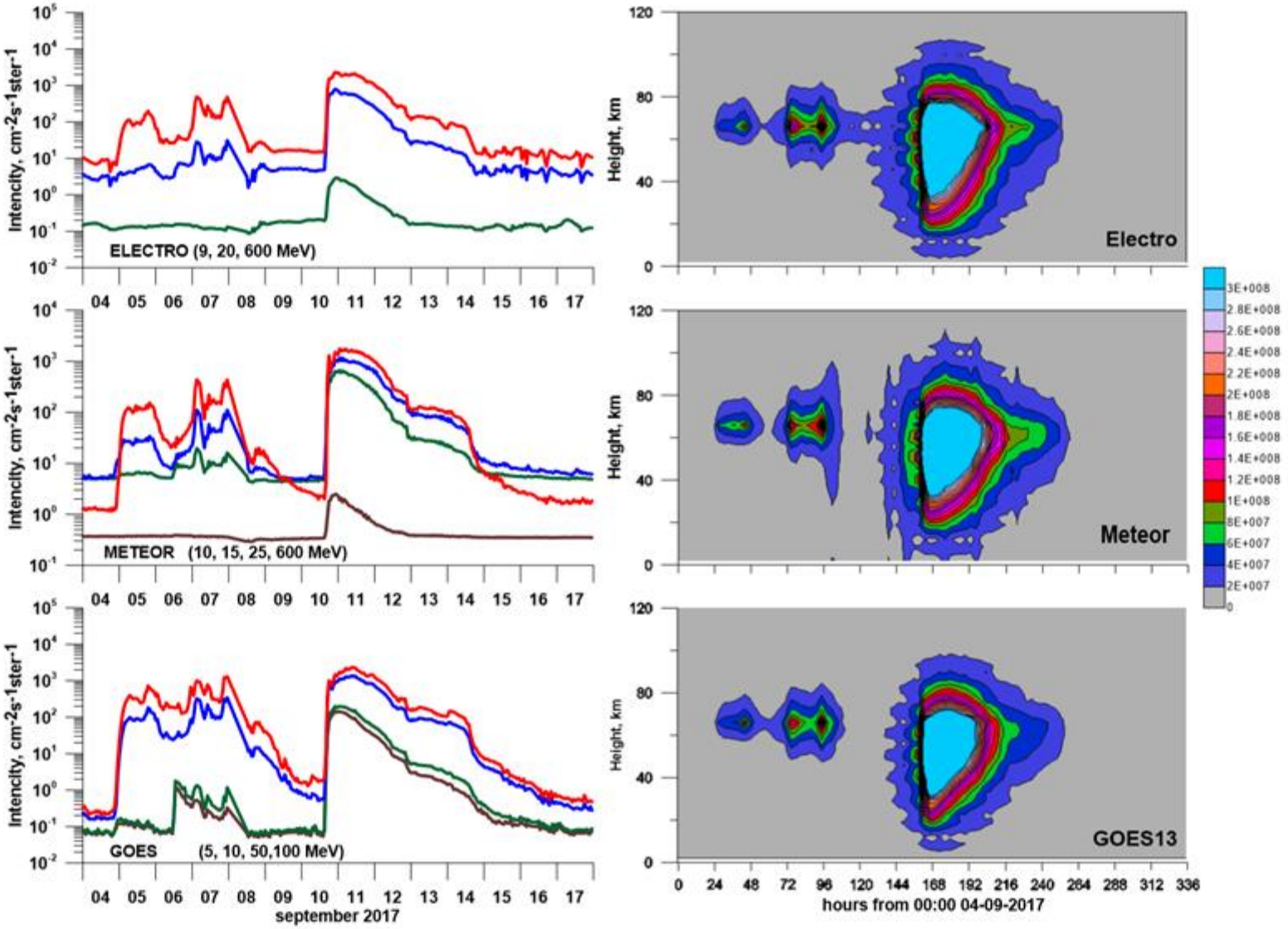
Выполнять прогнозирование положения экстремальной границы проникновения протонов СКЛ разных энергий.

Данный прогноз является важным (особенно для прикладных задач) компонентом программ прогнозирование космической погоды.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

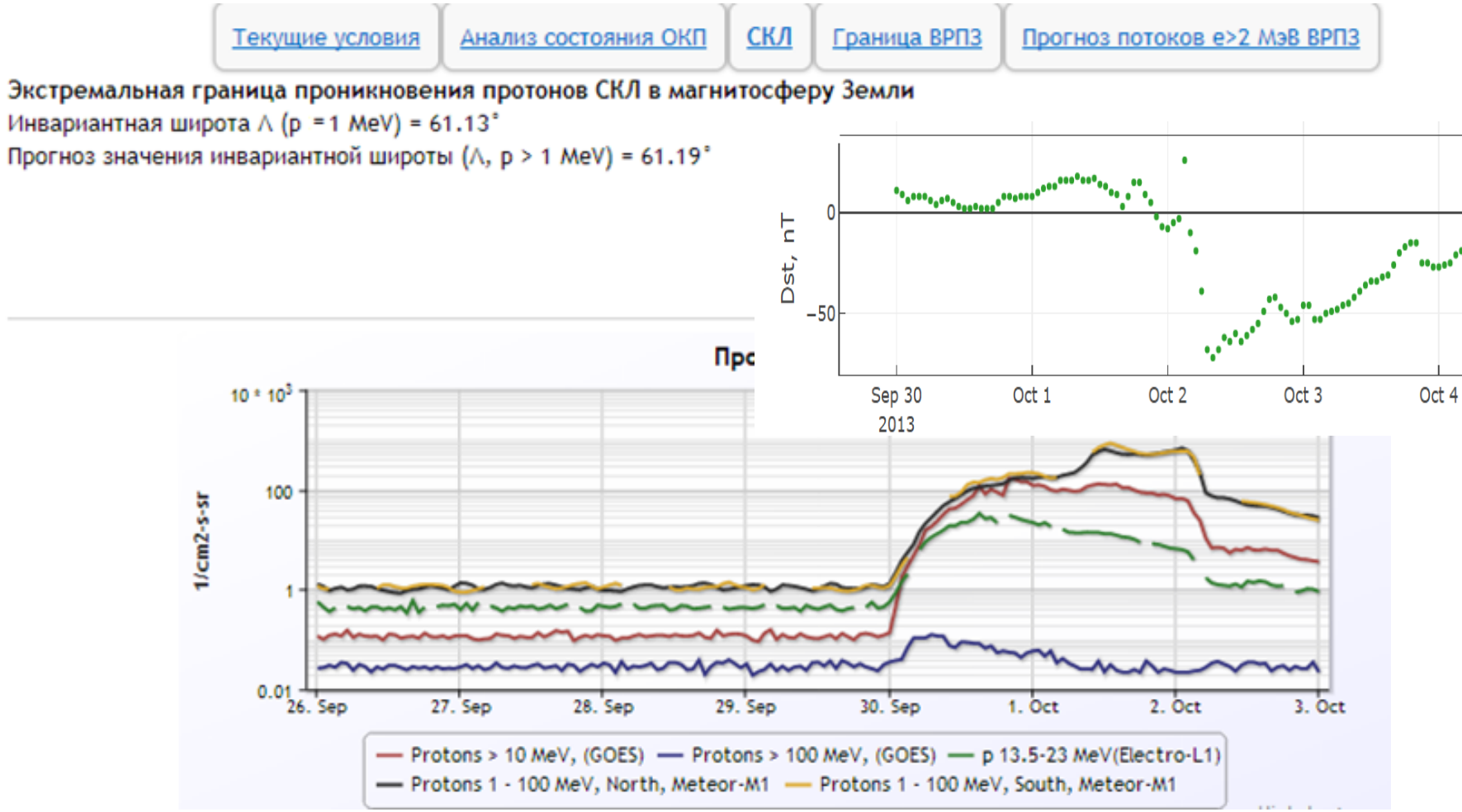
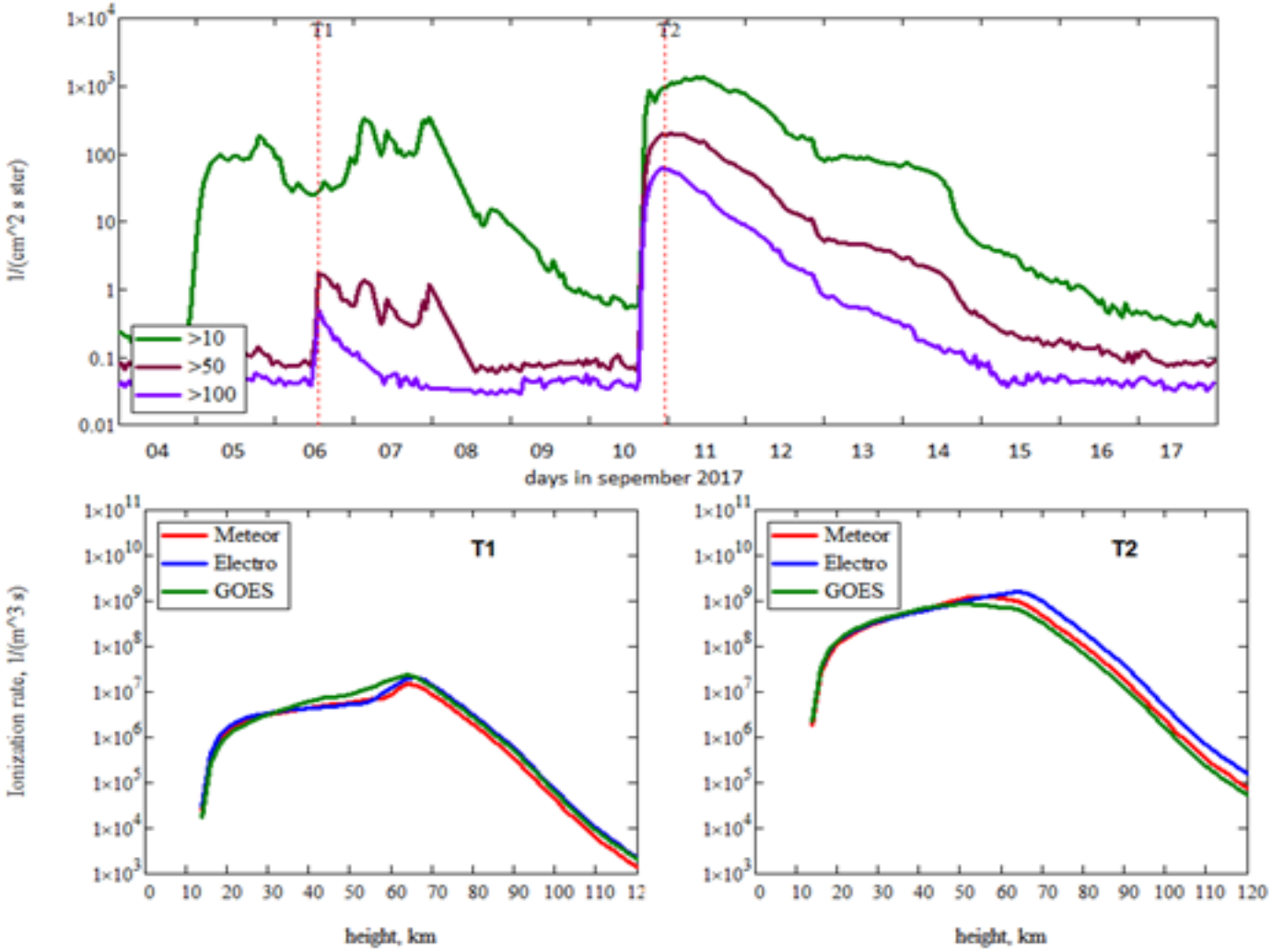
НИИЯФ МГУ

Временной ход протонов СКЛ и профилей ионизации по данным Электро, Метеора GOES



В экспериментальном режиме была реализована модель краткосрочного прогнозирования экстремального положения границы проникновения протонов СКЛ в магнитосферу Земли на высотах до 1000 км. Прогнозирование основано на эмпирической зависимости границы проникновения и прогнозе Dst и Кр-индексов при помощи искусственных нейронных сетей:

http://swx.sinp.msu.ru/radiastatus/skl.php *- в данный момент на реконструкции*



Высотный ход ионизации в моменты максимальных потоков наиболее энергичных протонов 06 и 10 сентября 2017