



Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова
ФГБУ «ИПГ»

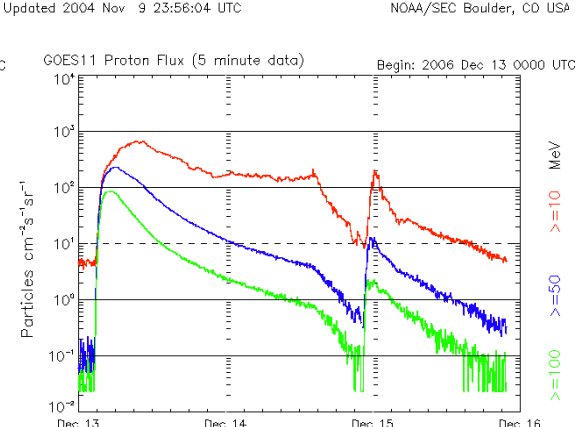
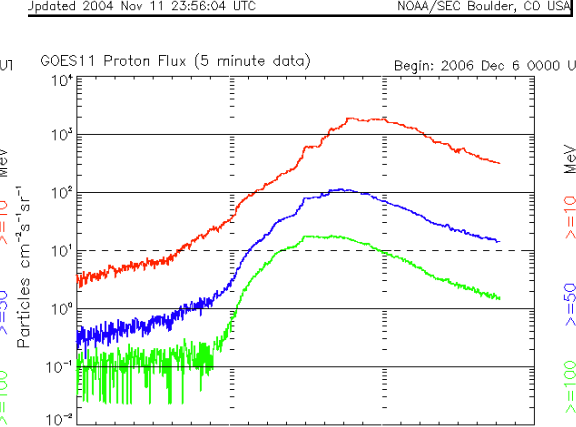
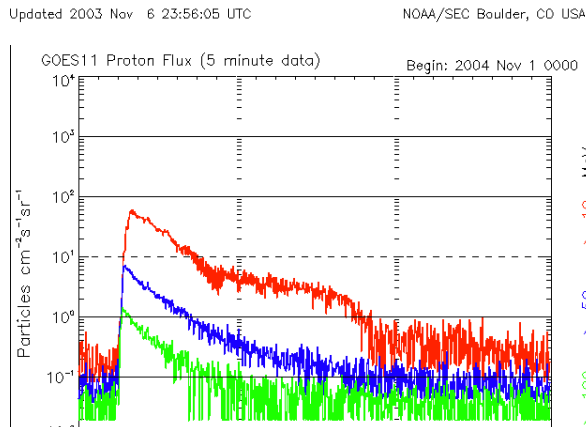
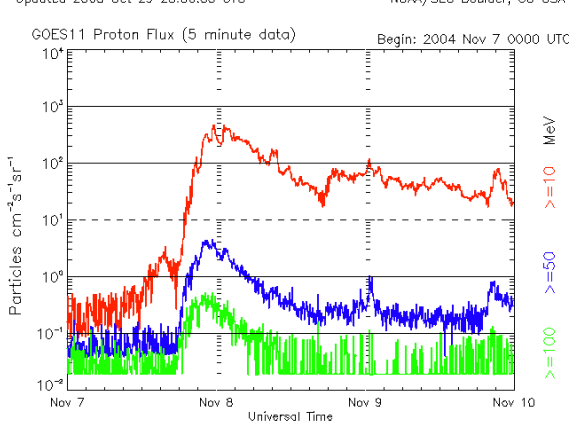
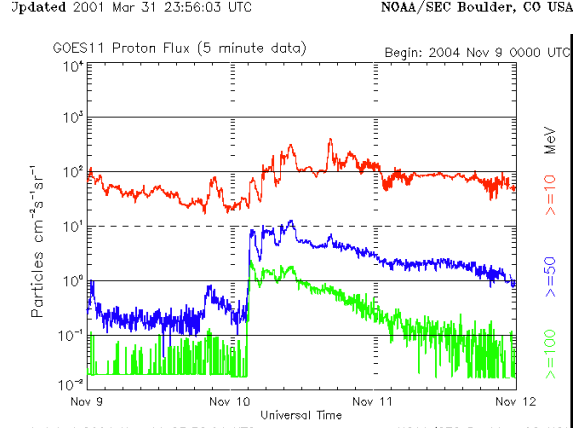
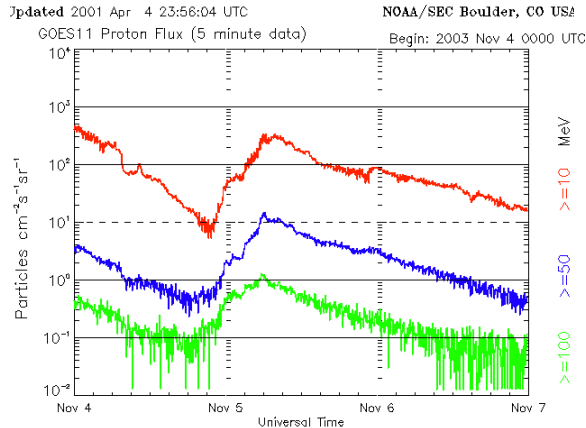
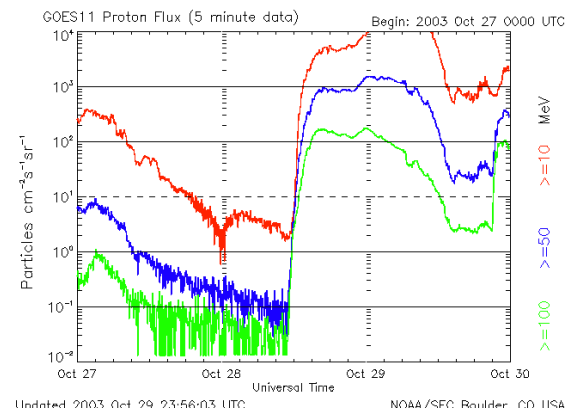
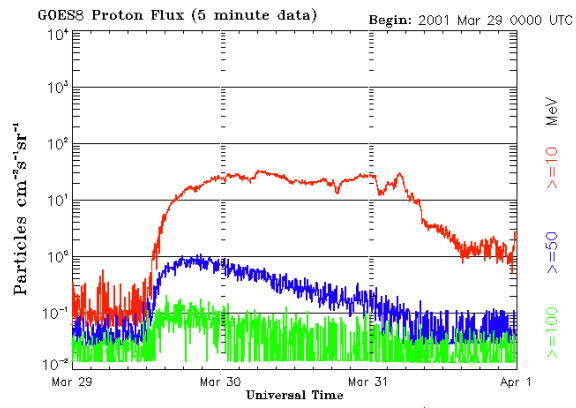
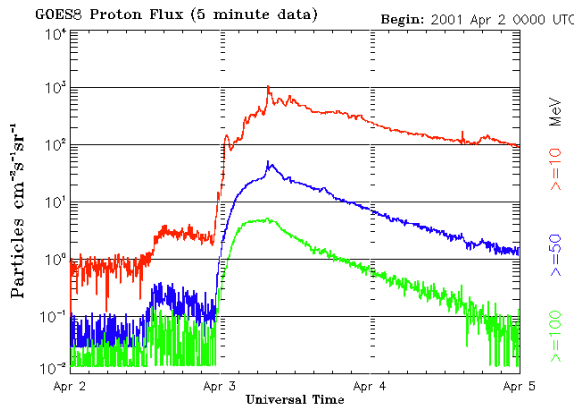


Основан в 1956 г.

*Масштабное подобие временного развития солнечных
протонных событий в 23 цикле солнечной активности.*

Очелков Ю.П.

37 Всероссийская конференция по космическим лучам



Масштабное подобие СПС

В общем виде временной ход СПС может быть описан формулой:

$$J(t) = J_m(E)f(t, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n, \alpha(E))$$

Для определенного интервала времени δt может реализоваться случай когда $\tau_1 \sim \delta t$, а остальные временные параметры либо много больше либо много меньше τ_1 , тогда получим:

$$J(t) = J_m(E)f(t, \tau_1, \alpha(E))$$

Если реализуется ситуация, когда $\alpha(E) = \text{const}(E)$, то функция f будет одинаковая для всех событий и всех энергий и будет зависеть от одного временного параметра.

Тогда можно записать: $\frac{J(x)}{J_m} = f(x)$, где $x = \frac{t}{\tau_1}$ и можно говорить о масштабном подобии (скейлинге) СПС. В качестве временного параметра можно выбрать время достижения максимума события $\Delta t_m = T_m - T_{inj}$ (если масштабное подобие наблюдается по крайней мере до максимума события). В этом случае временной ход определяется только тремя параметрами: J_m , T_m , T_{inj} .

Беловский М.Н., Очелков Ю.П. Геомагнетизм и аэрономия, 1981.т.21,№5.

Очелков Ю.П. Масштабное подобие временного развития солнечных протонных событий. Гелиогеофизические исследования. 2018 г., выпуск 19 с 47-74

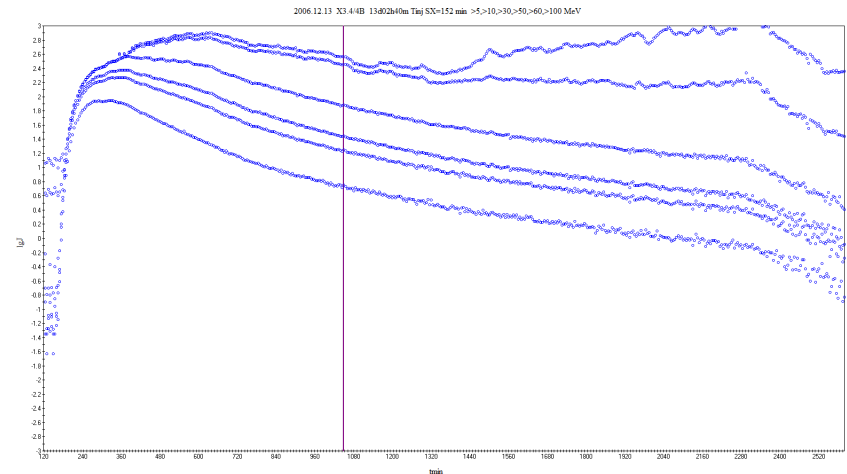
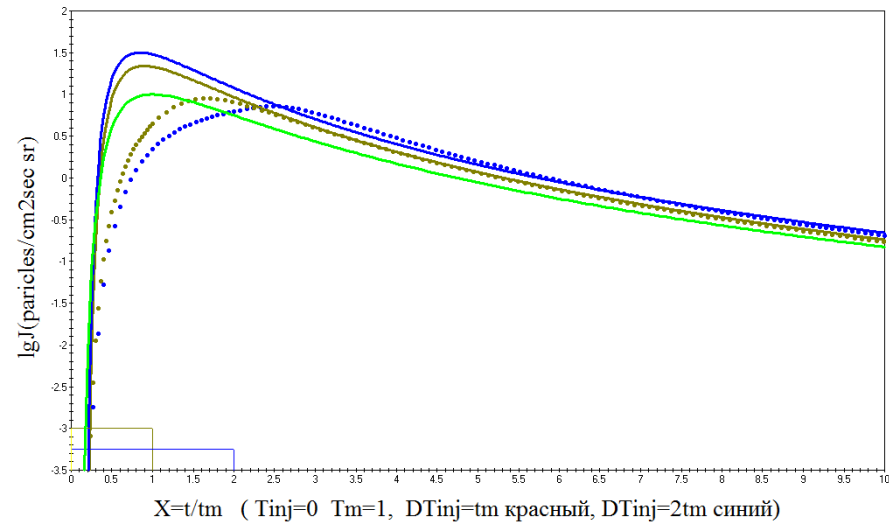
$$f(x) = x^{-3} e^{3\left(1 - \frac{1}{x}\right)} \quad x = \frac{t - T_{inj}}{\Delta t_m}$$

Эта функция хорошо совпадает с решением уравнения диффузии в трехмерном пространстве с коэффициентом диффузии, зависящим от расстояния по линейному закону.

Возмущения масштабноподобного временного профиля

Невозмущенный временной ход встречается редко, для многих событий имеют место возмущения.

На стадии максимума это в основном влияние длительной инъекции, на стадии спада – влияние ударных волн от коронального выброса масс (КВМ) для события, в котором были инжестированы протоны, либо от предшествующих корональных выбросов.



Пример длительной инъекции. Точки –рассчитанные значения. Сплошные линии-аппроксимация зависимостью $/1/$. Нижняя кривая-мгновенная инъекция

Очелков Ю.П. Масштабное подобие временного развития солнечных протонных событий. Гелиогеофизические исследования.2018 г., выпуск 19, с 47-74)

Пример возмущения от ударной волны.
Снизу вверх >100, >60,>50,>30,>10 МэВ (GOES)

[

Аппроксимация временных профилей СПС 23 цикла солнечной активности

Цель настоящего исследования - установить как часто наблюдаются события со скейлингом в цикле солнечной активности на примере событий 23 цикла .

Использовались временные профили событий для которых наблюдались потоки протонов с энергией больше 100 МэВ заметно превышающий фоновый уровень. Всего были построены профили для 51 события.

Данные по потокам протонов с КА GOES с пятиминутным усреднением с сайта

<https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/avg/>

Данные для каналов 10-30 МэВ, 30-50 МэВ, 50-60 МэВ, 60-100 МэВ получены путем вычитания данных интегральных каналов >10,>30,>50,>60,>100 МэВ.

На всех рисунках ось X – время в минутах, начало отсчета-00 UT для суток начала протонного события. Все временные параметры также в минутах. На рисунках: точки – данные GOES, сплошные линии– аппроксимация зависимостью:

$$lgJ = lgJ_m - 3 \left(lg \frac{t - T_{inj}}{\Delta t_m} - lge \left(1 - \frac{\Delta t_m}{t - T_{inj}} \right) \right)$$

Данные по KBM (CME) взяты с сайта https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

Привязка: 1.Каталог солнечных протонных событий 23-го цикла солнечной активности (1996 – 2008 гг.)(под редакцией Ю.И.Логачева).Москва - 2016

2.The Catalog of Solar Flare Events with X-ray Class M1 - X>17.5 XXIII cycle of Solar Activity (1996 - 2007)

http://www.wdcb.ru/stp/data/FL_XXIII/FI_XXIII.txt

Мы будем различать 4 вида событий. События, в которых скейлинг наблюдается либо на фазе роста и значительном интервале времени на фазе спада, мы будем обозначать как SC события; события, в которых скейлинг наблюдается на фазе роста и небольшом временном интервале времени (меньшем чем фаза роста) на фазе спада, - SCr+ события; события, в которых скейлинг наблюдается только на фазе роста, - SCr события; события в которых скейлинг наблюдается на части фазы роста (если имеется хорошо выраженный излом временного хода), – SCr- события. По времени инъекции мы будем разделять события на два класса: в первом классе SX -время инъекции практически совпадает с временем максимума мягкого рентгеновского излучения (0.1-0.8 нм), во втором классе CME – время инъекции заметно отличается от времени максимума рентгеновского излучения и инъекция может быть связана с CME.

События со скейлингом на фазе роста и значительном интервале времени на фазе спада (обозначение событий: SC) (17 из 51)

(rsx-удаление KBM от Солнца во время максимума рентгеновской вспышки
rsc-удаление KBM от Солнца в момент инжекции протонов T_{inj} при аппроксимации профиля
масштабноподобной зависимостью, R_o -радиус Солнца.)

№	Дата	Класс,координаты Время начала и макс. SX (солн.вр., мин.)	Er: 10-30 30-50 50-60 60-100 >100 1. T_{inj} 2. $\Delta t_m = T_m - T_{inj}$ 2. $lgJm$	rsx rsc	Инжекция
1	1997.11.04	X2.1 S14W34 344 350	1 - 350 348 350 348 2 - 285 265 210 185 3 - 0.95 0.85 0.65 0.47	rsx=rsc=3Ro	SX
2	1997.11.06	X9.4 S18W63 704 707	1 - - 690 690 684 2 - - 325 305 275 3 - - 1.6 1.75 1.73	rsx=3Ro rsc=Ro	CME
3	1999.06.01	C1.2 n25w90* 1125 (1136)	1 - 1110 1110 1115 1115 2 - 600 540 500 450 3 - 0.7 -0.10 -0.05 -0.375	rsx=6Ro rsc =2.6Ro	CME?
4	1998.09.30	M2.8 N23W78 780 822	1 - 818 818 818 818 2 - 260 220 190 140 3 - 2.1 1.32 1.25 0.75	gap	SX
5	2000.07.22	M3.7 N14W56 669 686	1 686 686 686 686 686 2 200 140 120 100 90 3 1.1 0.4 -0.3 -0.2 -0.55	rsx=rsc=2.8Ro	SX
6	2000.09.12	(M1.0 S19W08) 683 712	1 570 570 570 570 570 2 1200 1000 1000 850 700 3 2.2 0.8 -0.18 -0.13 -0.55	rsx=7.5Ro rsc=0.5Ro	?
7	2001.03.29	X1.7 N16W12 587 607	1 607 607 607 607 607 2 600 570 550 500 400 3 1.5 0.5 -0.28 -0.45 0.95	rsx=rsc=2.8Ro	SX
8	2001.04.02	X>17.5 n19W90* 1284 1303	1 1302 1302 1305 1302 1305 2 460 450 450 450 390 3 2.85 2.1 1.3 1.2 0.7	rsx=rsc=3Ro	SX
9	2001.04.12	X2.0 S20W42 571 620	1 - 655 660 660 660 2 - 170 148 155 135 3 - 1.55 0.93 0.98 0.83	rsx=2.5Ro rsc=6.5Ro	CME

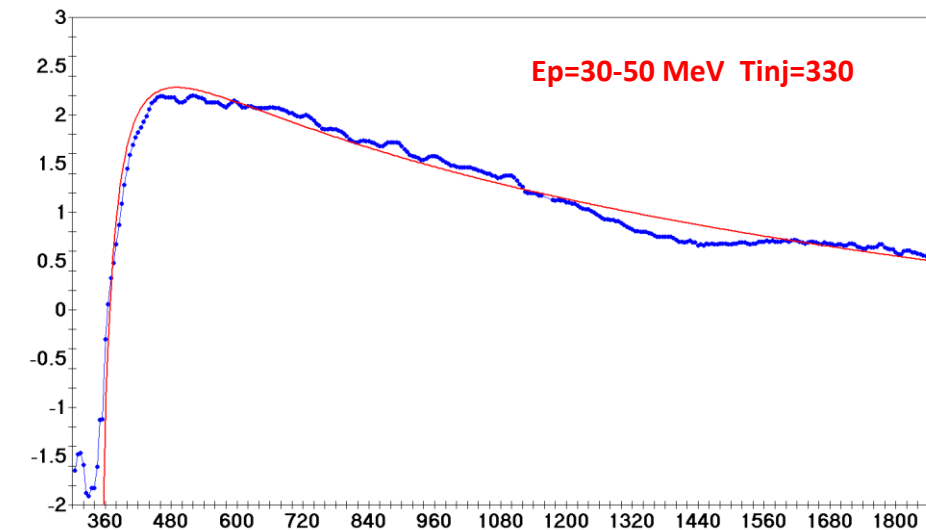
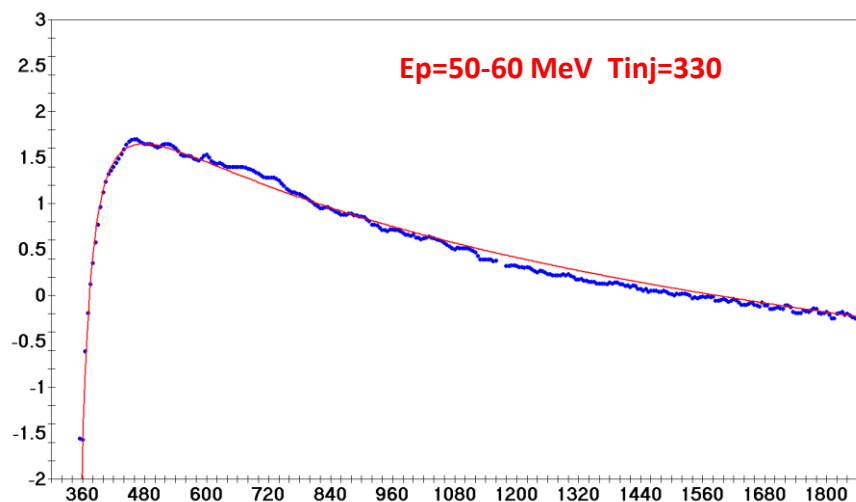
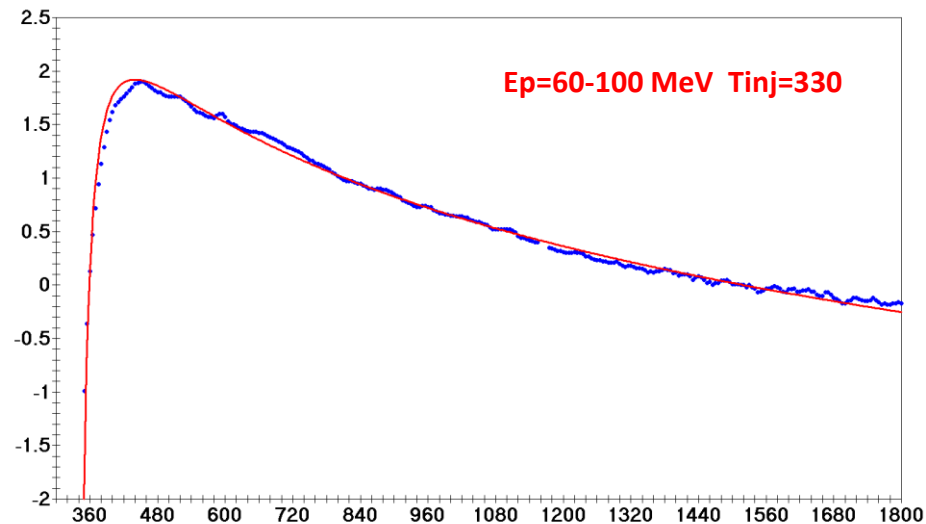
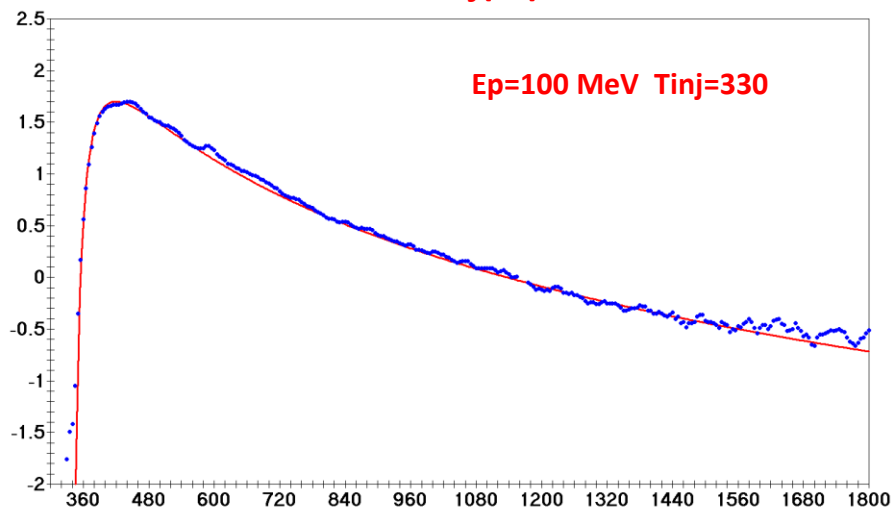
№	Дата	Класс,координаты Время начала и макс. SX (солн.вр., мин.)	Ep: 10-30 30-50 50-60 60-100 >100 1. T_{inj} 2. $\Delta t_m = T_m - T_{inj}$ 3. IgI_m	rsx rSC	Инжекция
10	2001.04.15	X14.4 S20W84 791 822	1 - 805 805 805 805 2 - 190 160 150 120 3 - 2.5 1.9 2.15 2.2	rsx=3Ro rsc=Ro	CME
11	2001.05.20	M6 s18w90* 352 355	1 - 340 340 340 337 2 - 350 270 255 215 3 - 0.1 0.35 -0.15 -0.1	rsx=2.3Ro rsc=1.2Ro	CME
12	2001.06.15	1. Обр.ст. BSWL<15.56 2. M6.3 S06E42 593	1 - 945 945 950 945 2 - 260 180 120 60 3 - 1.55 0.0 -0.12 -0.3	rsc=5Ro	?
13	2001.12.26	M7.1 N08W54 264 332	1 332 332 332 330 330 2 285 160 146 110 90 3 2.8 2.28 1.65 1.92 1.7	rsx=rsc=5Ro	SX
14	2002.08.24	X3.1 S02W81 41 64	1 - 58 60 60 60 2 - 140 127 110 85 3 - 1.75 1.22 1.5 1.49	rsx=rsc=3Ro	SX
15	2003.05.31	M9.3 S07W65 125 136	1 145 145 145 150 145 2 150 155 150 145 125 3 - 0.57 -0.01 0.25 0.18	rsx=1.5Ro rsc=3.0 Ro	CME
16	2004.09.19	X1.7 N16W12 587 607	1 607 607 607 607 607 2 600 570 550 500 400 3 1.5 0.5 -0.28 -0.45 0.95	gap	SX
17	2006.12.13	X3.4 S06W24 126 152	1 - 130 130 135 135 2 - 220 217 180 160 3 - 2.53 1.9 2.13 1.95	rsx=3Ro rsc=0.5Ro	CME

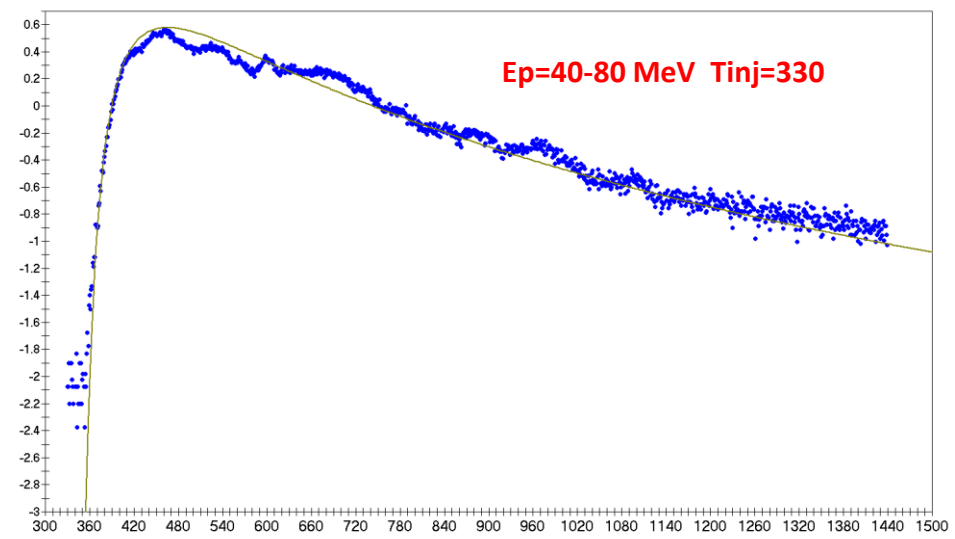
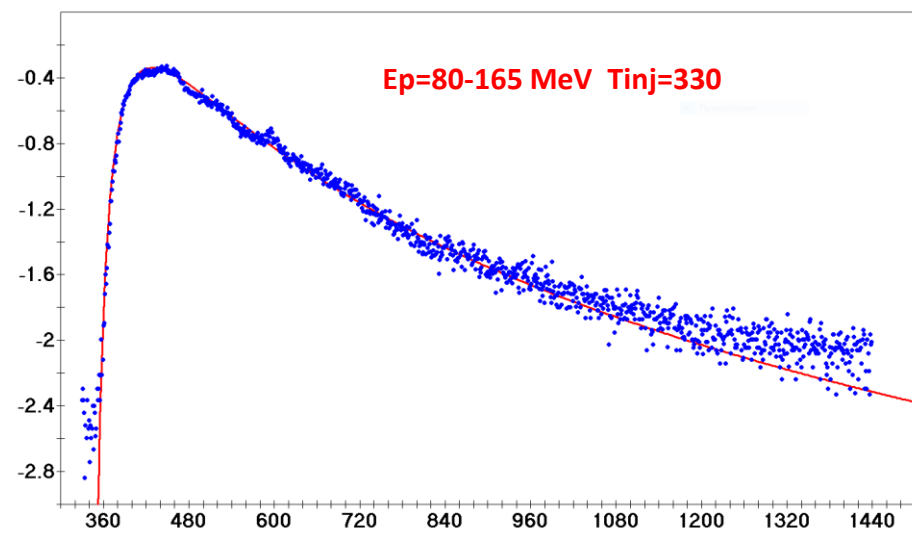
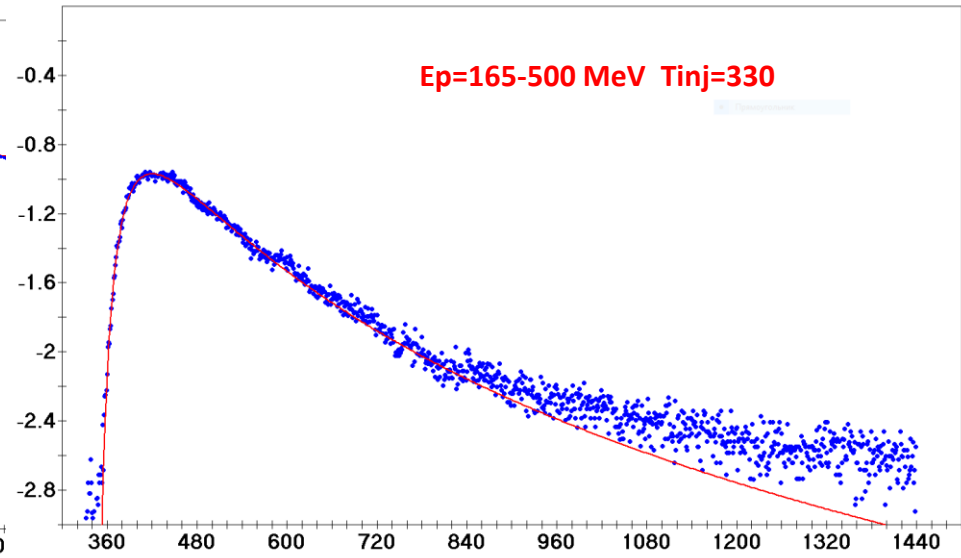
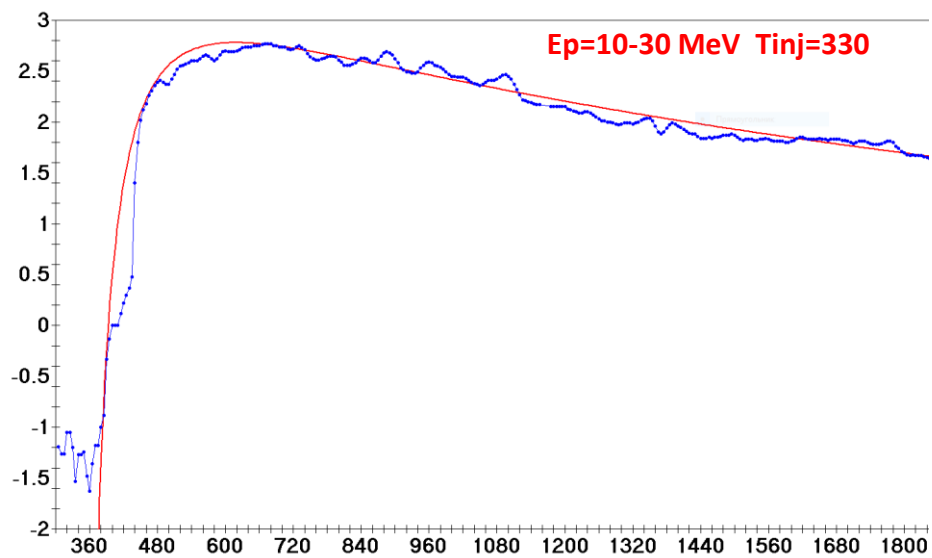
2001.12.26 M7.1 W54 $t(SX) = T_{max}(SX) - 8min = 332$ $r_{sx} = 5R_o$

SC

ось Y : lgJ_p (част/ см²с ср), ось X : время в мин.(0соотв 00час 26.12.2001)

$T_{inj}(sc) = 330$ $r_{sc} = 5R_o$ SX



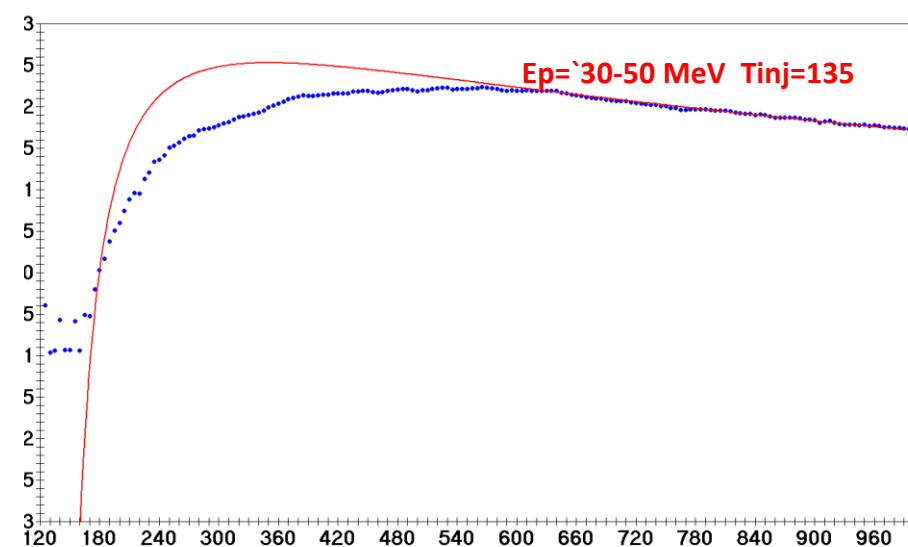
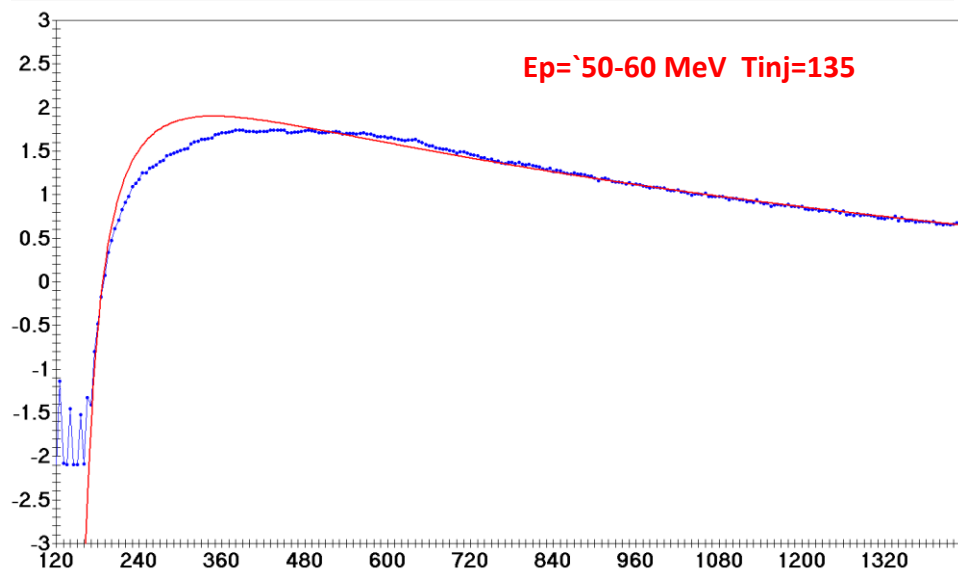
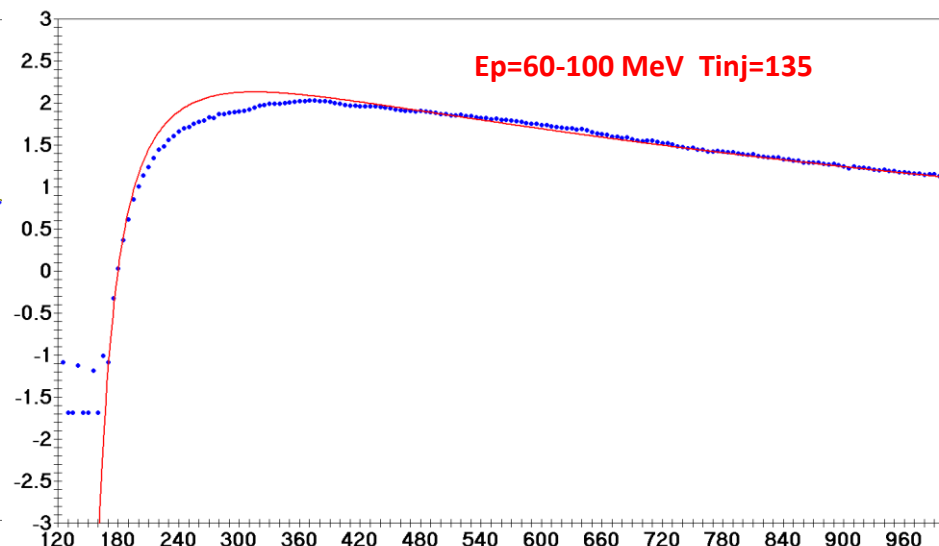
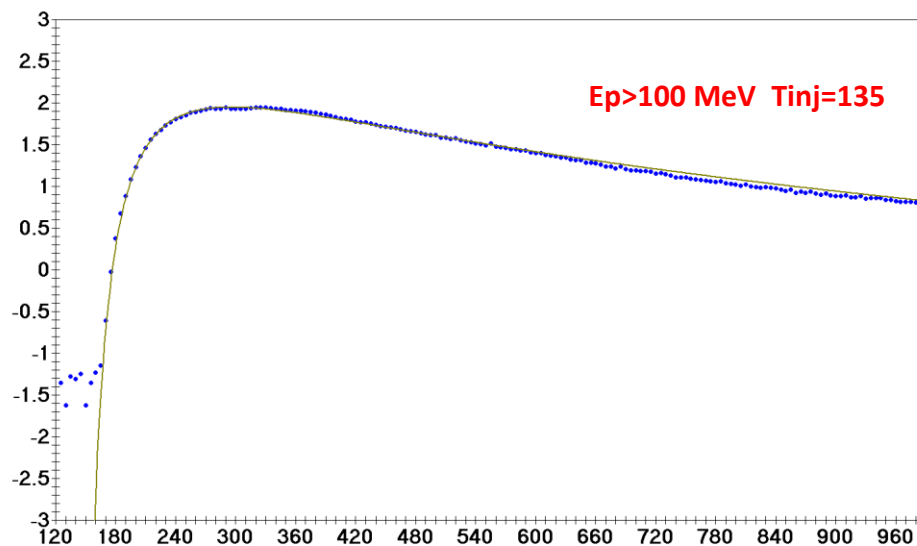


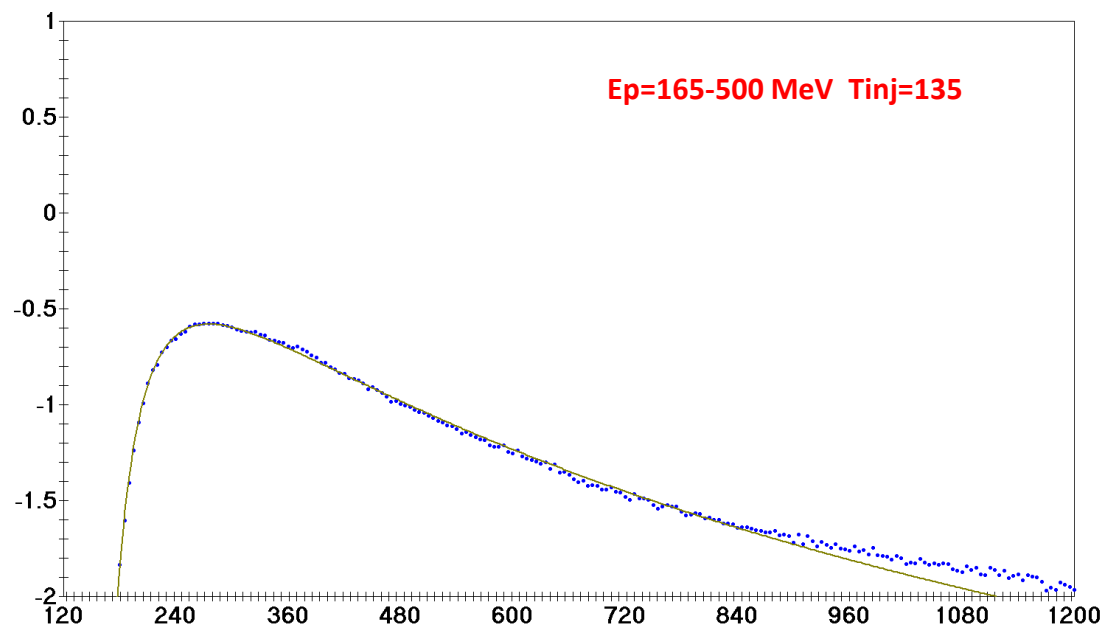
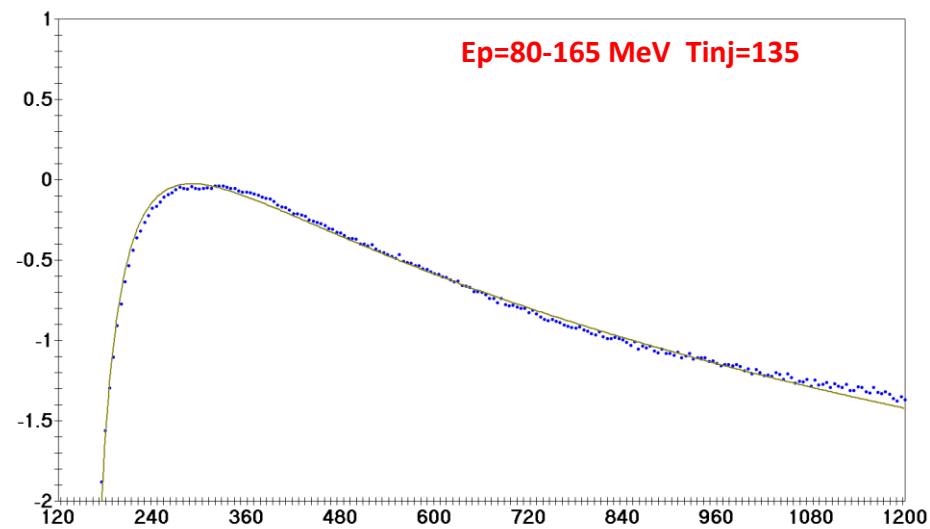
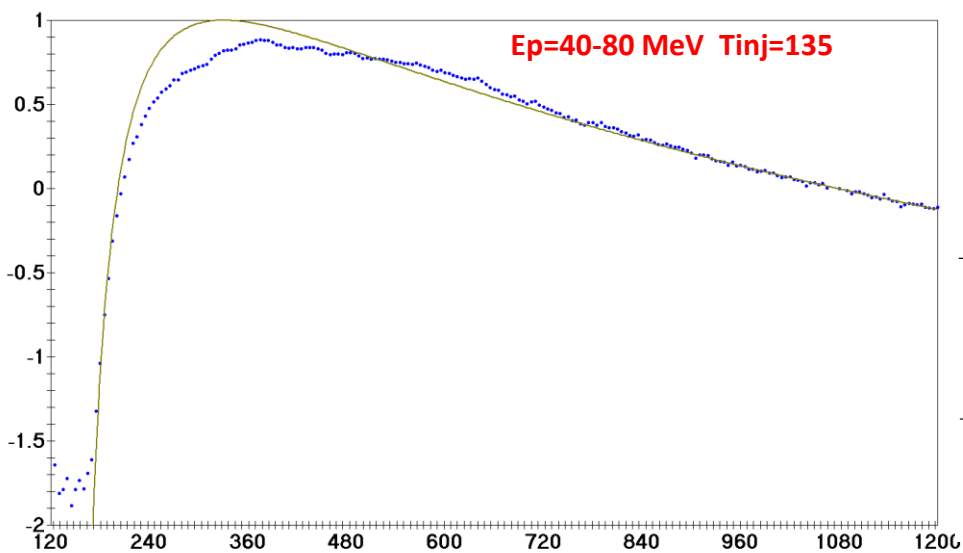
2006.12.13 S06W24 X 3.4 t(SX)= Tmax(SX) -8min=152 rsx=3.5Ro

SC

ось Y : lgJp(част/ см2с ср), ось X : время в мин.(0соотв 00час 13.12.2006)

Tinj(sc)=135 rsc=0.5Ro CME



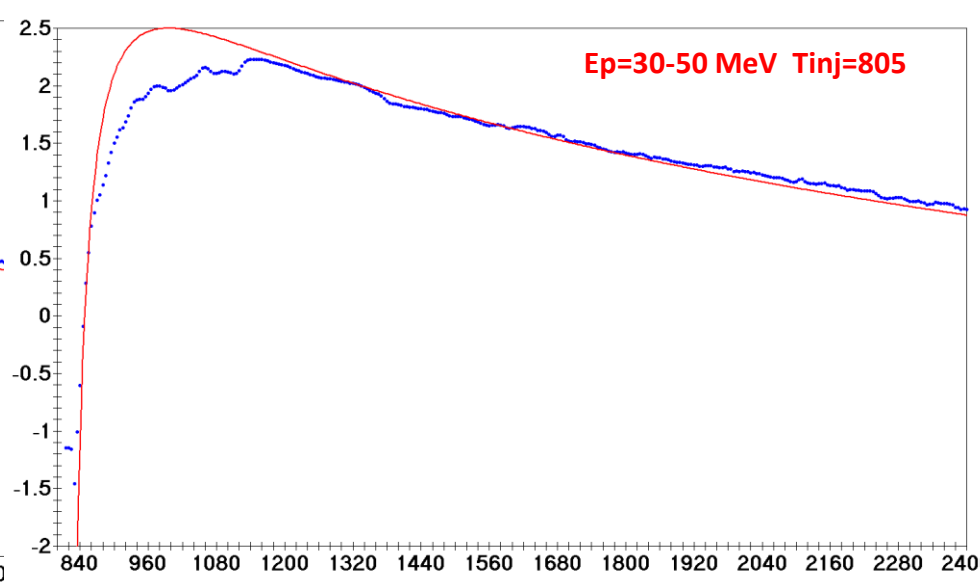
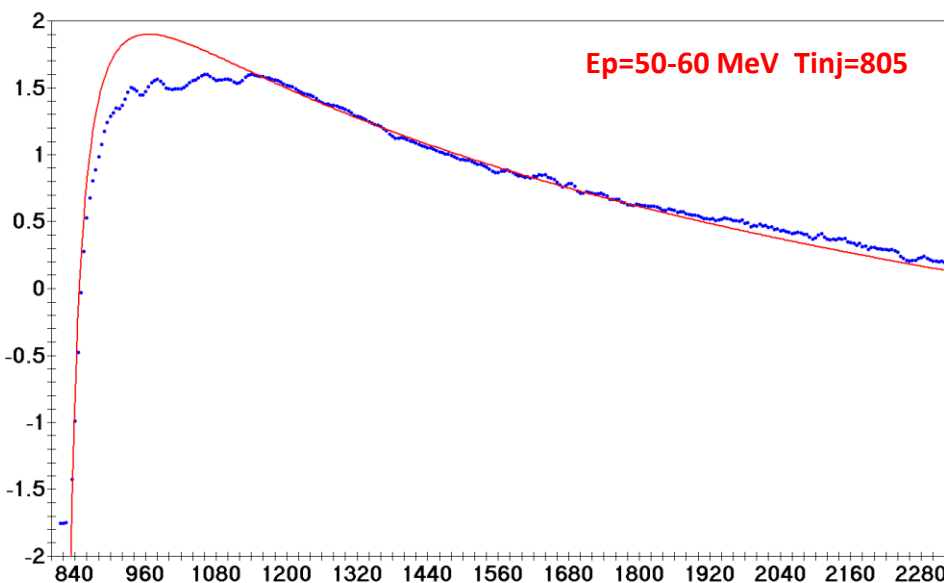
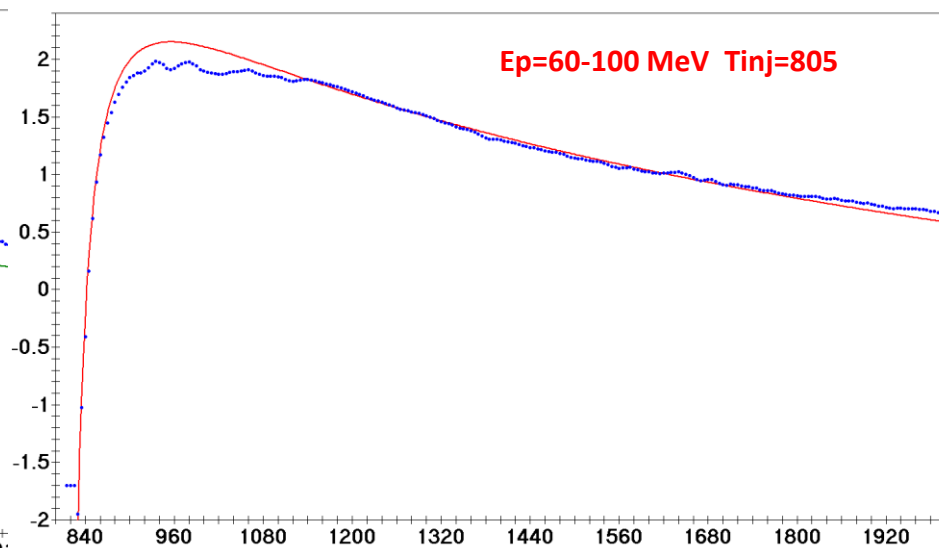
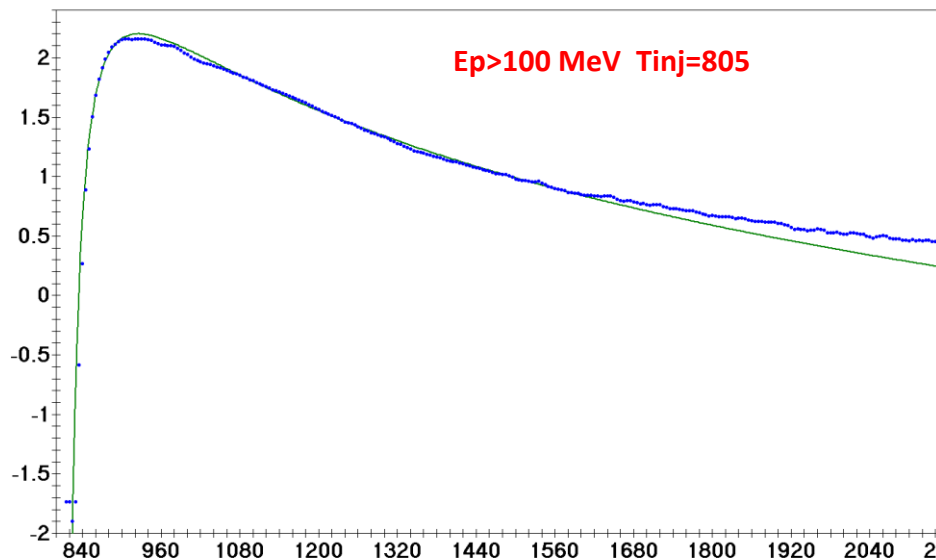


2001.04.15 X14.4 S20 W84 t(SX)= T_{max}(SX) -8min=822 rsx=3Ro

SC

ось Y : lgJp(част/ см2с ср), ось X : время в мин.(0соотв 00час 15.04.2001)

T_{inj}(sc)=805 rsc=0.5Ro CME

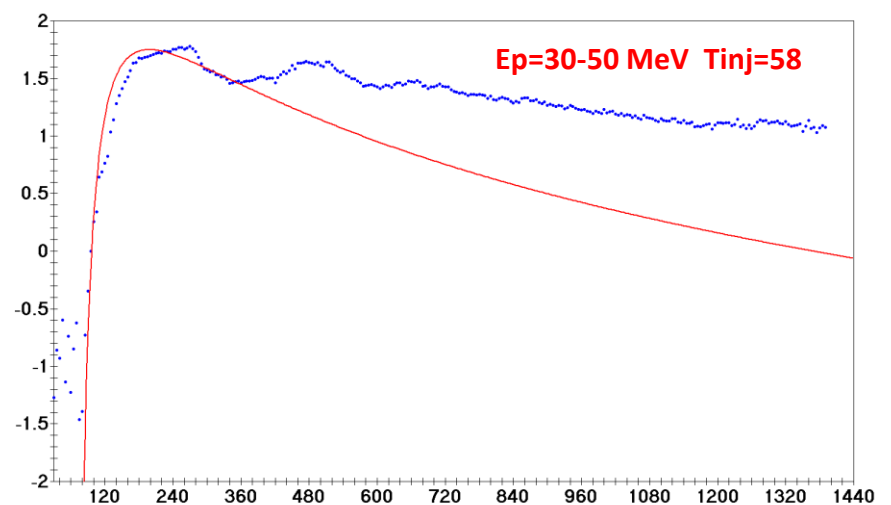
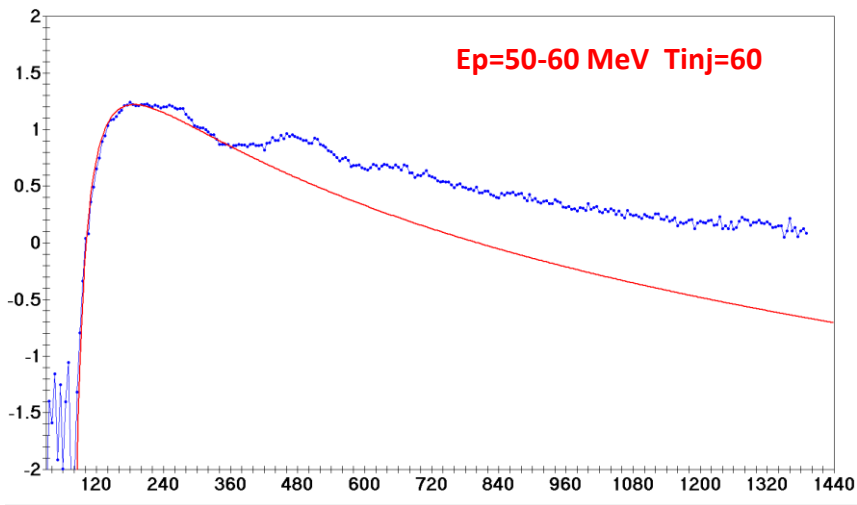
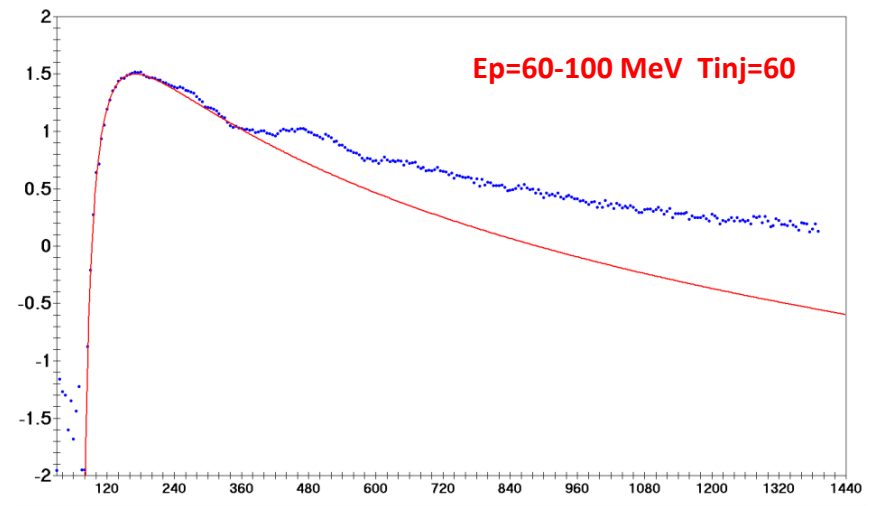
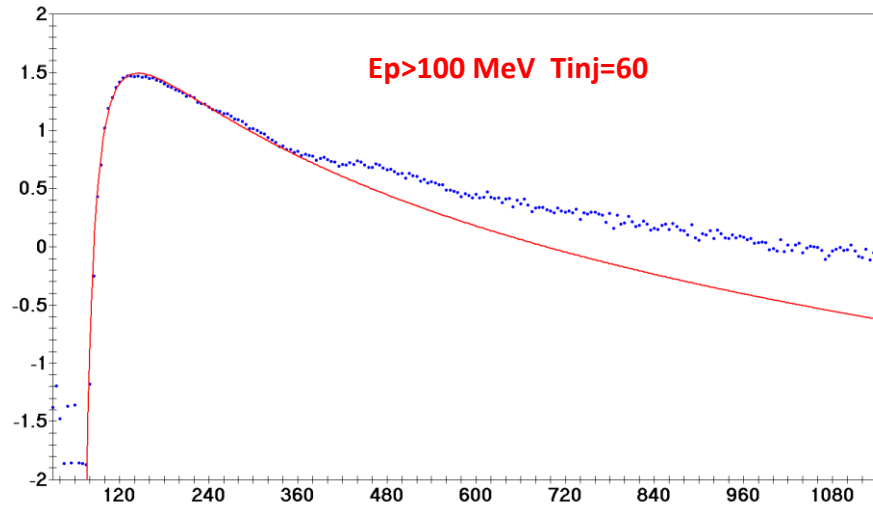


2002.08.24 S02W81 X 3.1 $t(SX) = T_{max}(SX) - 8min = 64$ $rsx = 3R_o$

SC

ось Y : lgJ_p (част/ см²с ср), ось X : время в мин.(0соотв 00час 24.08.2002)

$T_{inj}(sc) = 60$ $rsx = 3R_o$ SX

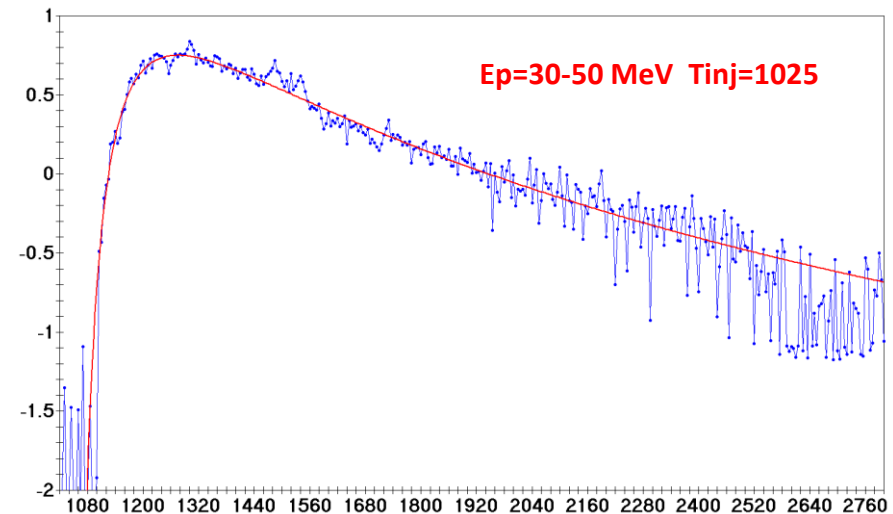
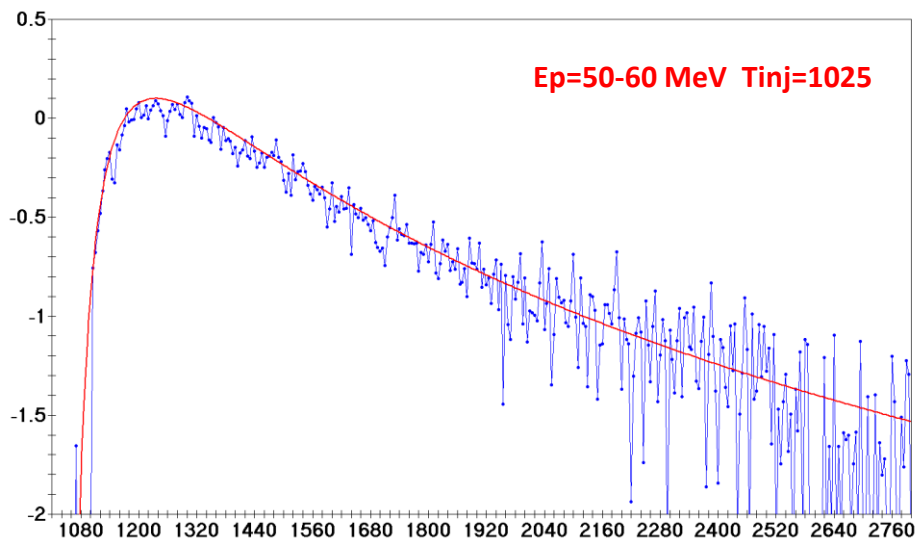
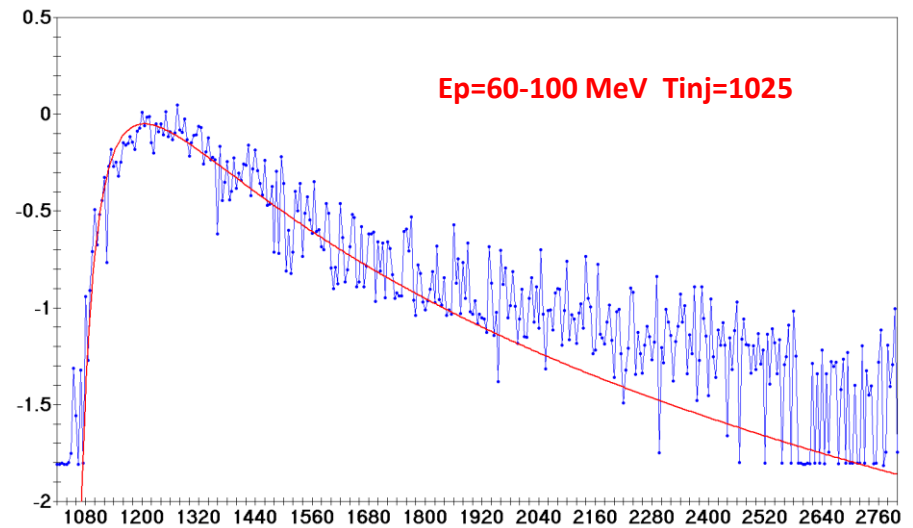
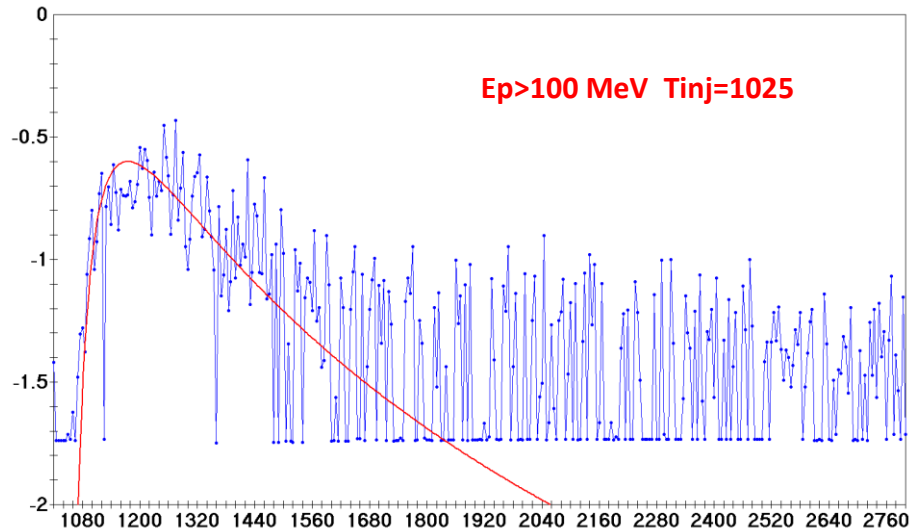


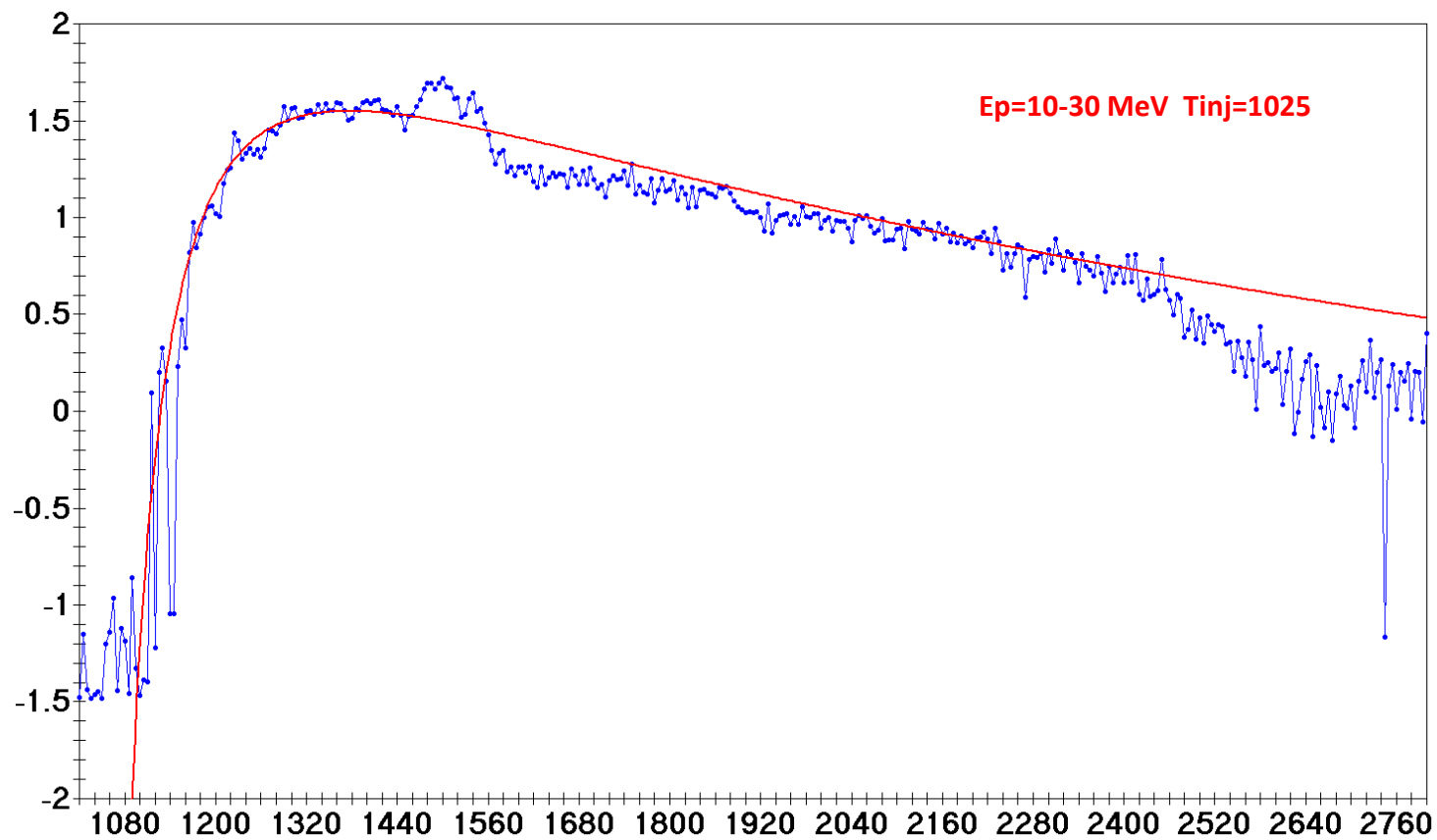
2004.09.19 n03W60* M 1.9 t(SX)= T_{max}(SX) -8min=1024 gap

SC

ось Y : lgJp(част/ см²с ср), ось X : время в мин.(0соотв 00час 09.19.2004)

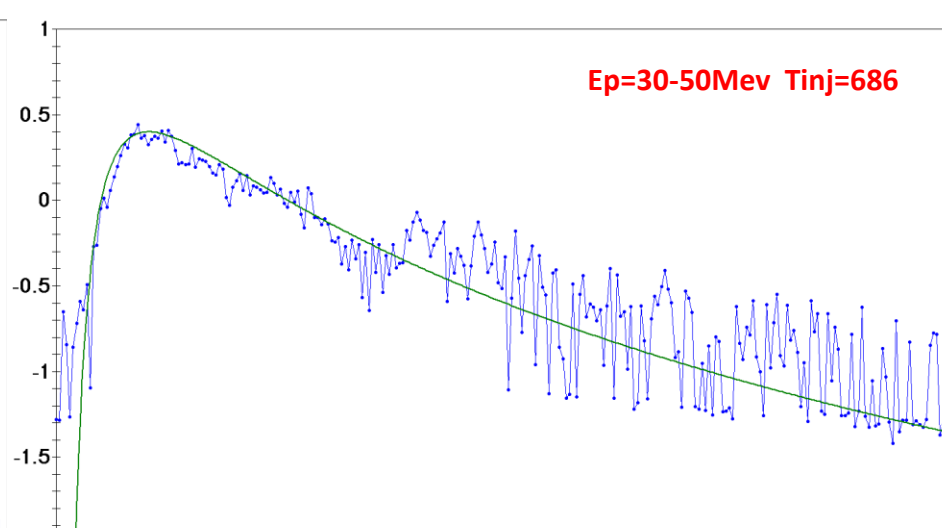
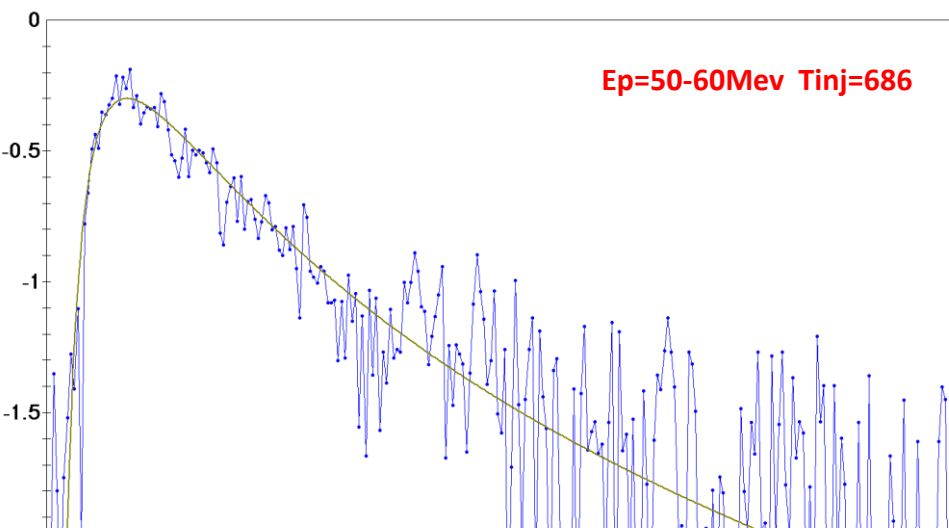
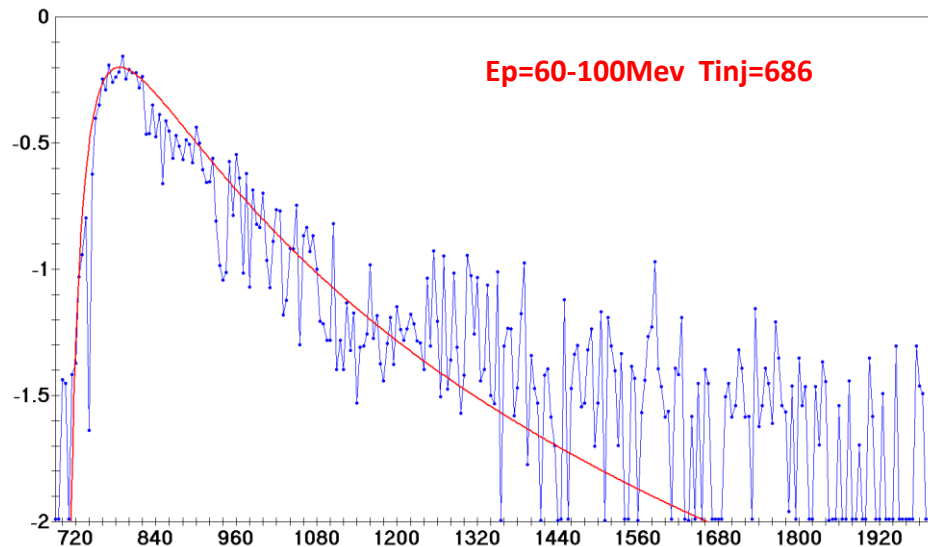
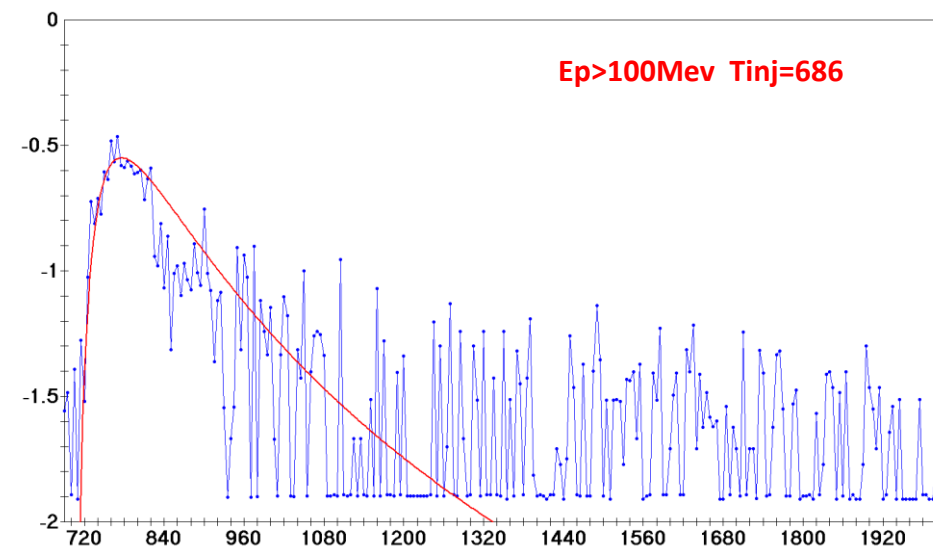
T_{inj}(sc)=1025 gap SX

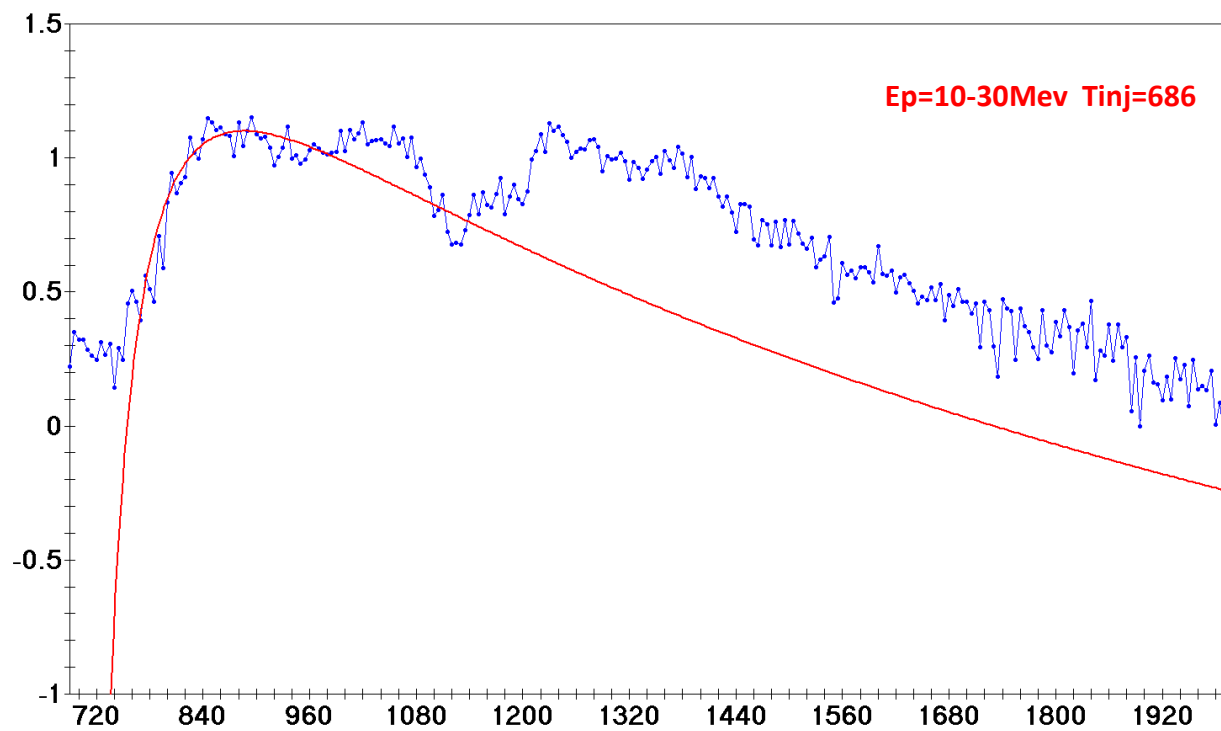




2000.07.22 N14W56 M 3.7 $t(SX) = T_{max}(SX) - 8min = 686$ $rsx = 2.8R_o$
ось Y : $lgJp$ (част/ см²с ср), ось X : время в мин.(0соотв 00час 22.07.2000)
 $T_{inj}(sc) = 686$ $rsc = 2.8R_o$ SX

SC



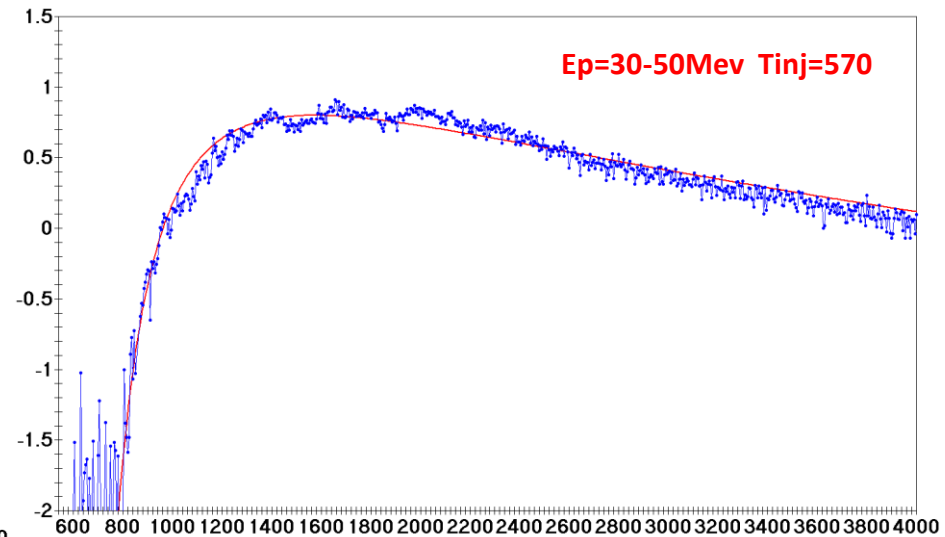
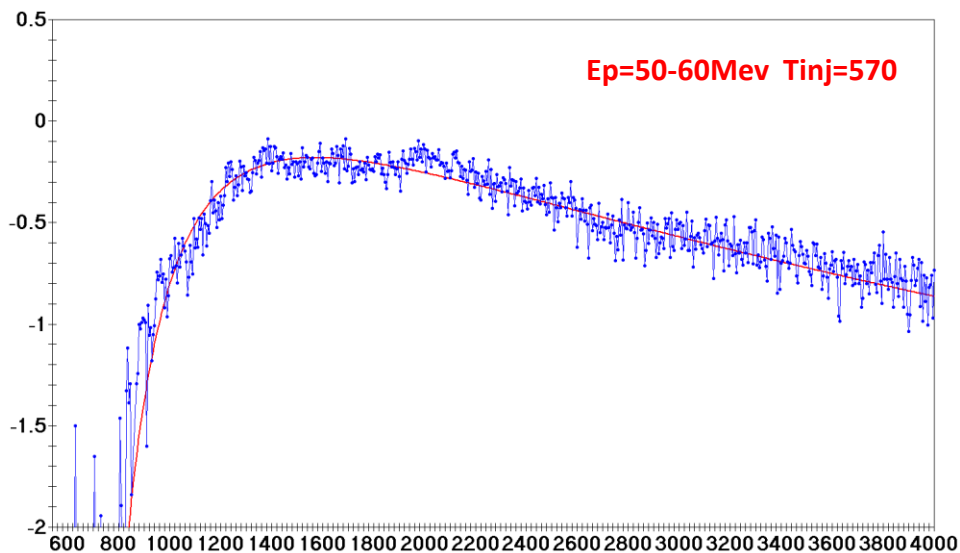
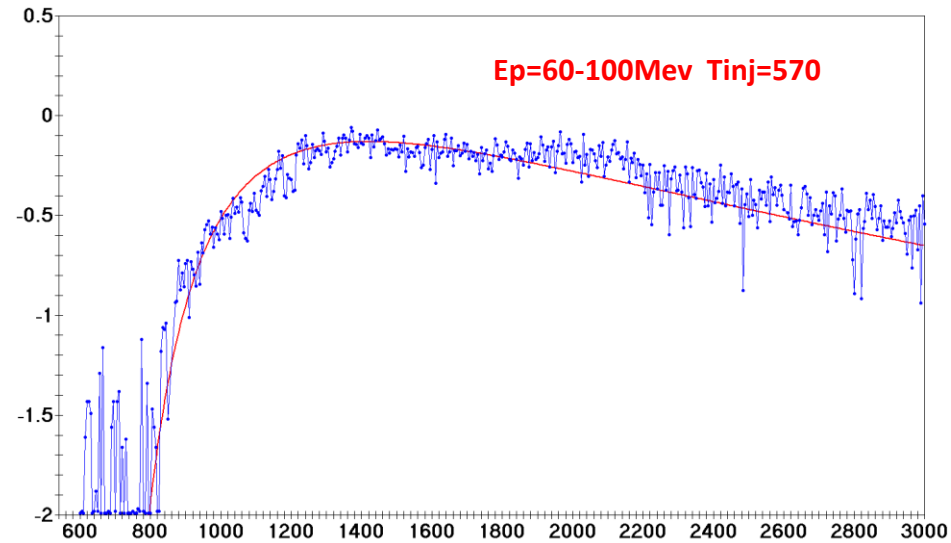
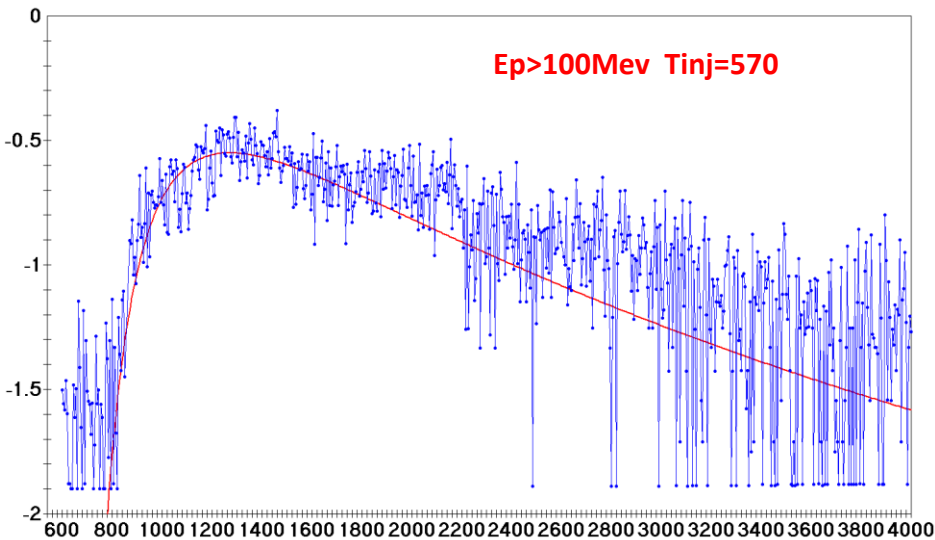


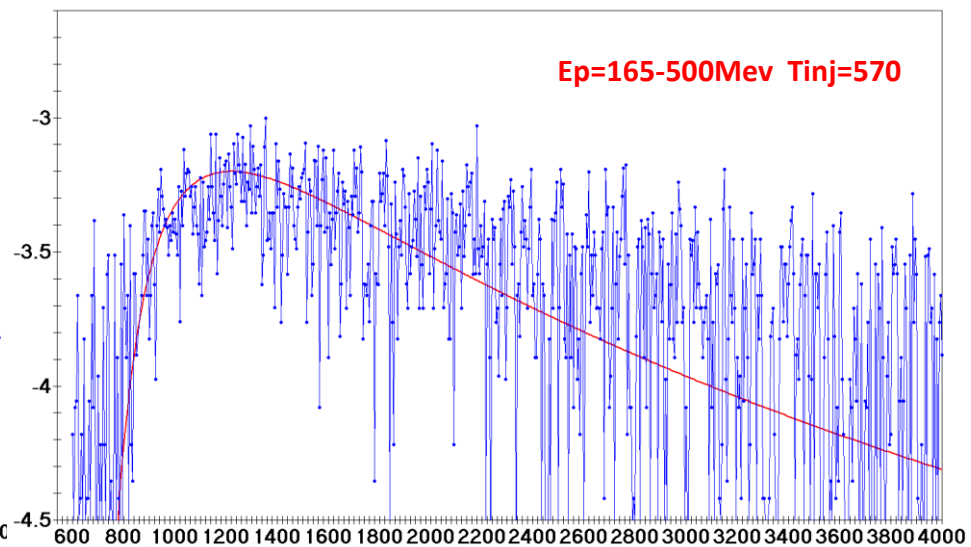
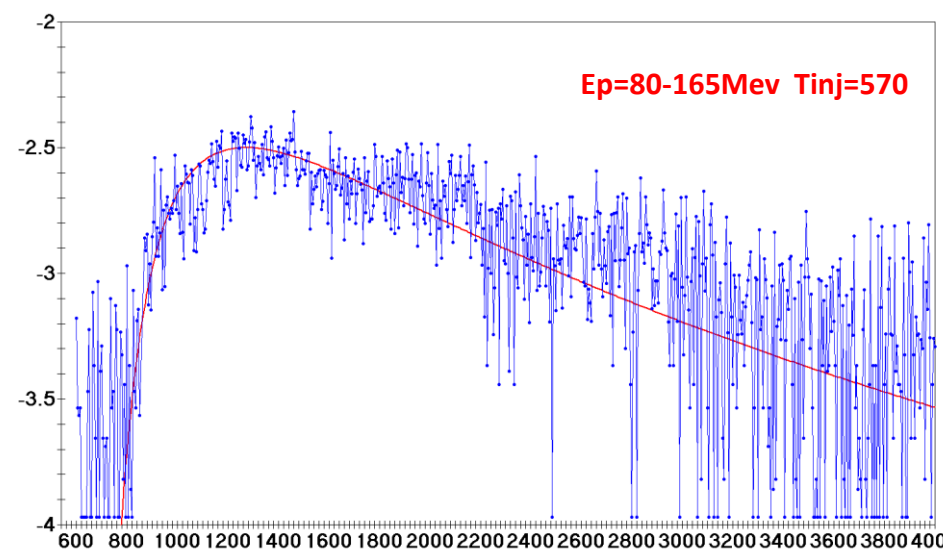
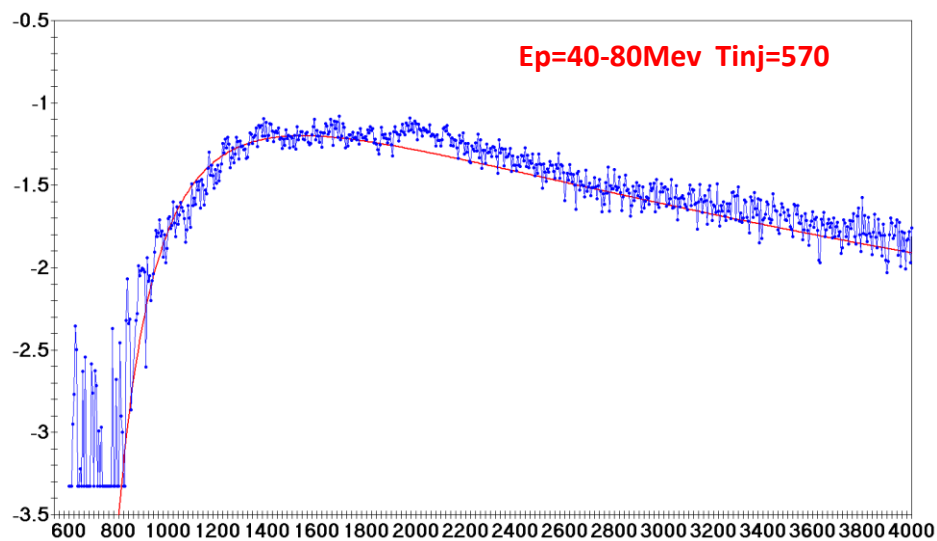
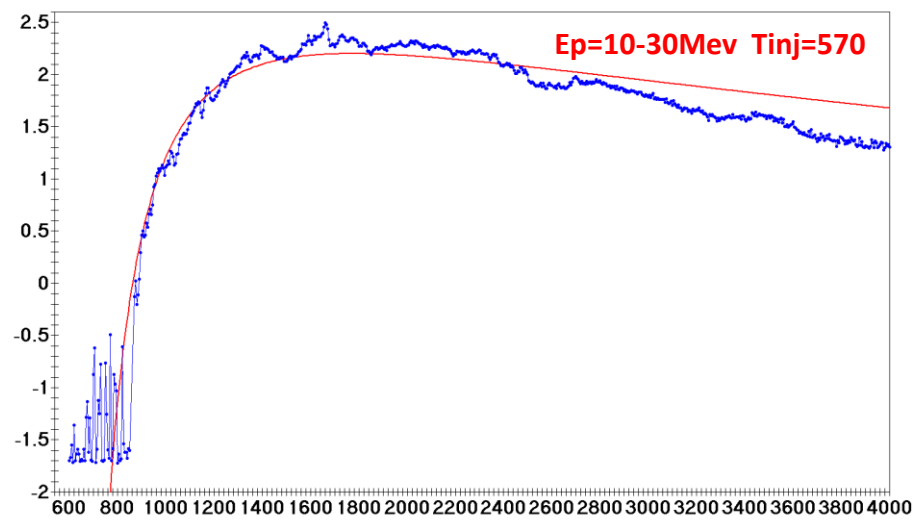
2000.09.12 S19W08 M 1.0 $t(SX) = T_{max}(SX) - 8min = 712$ $rsx = 7.5R_{\odot}$

SC

ось Y : $\lg J_p$ (част./ см²с ср), ось X : время в мин. (0 соотв 00 час 12.09.2000)

$T_{inj}(sc) = 570$ $rsc = 1R_{\odot}$?





События со скейлингом на фазе роста и небольшом временном интервале времени
(меньшем чем фаза роста) на фазе спада (обозначение событий: SCr+) (12 из 51)

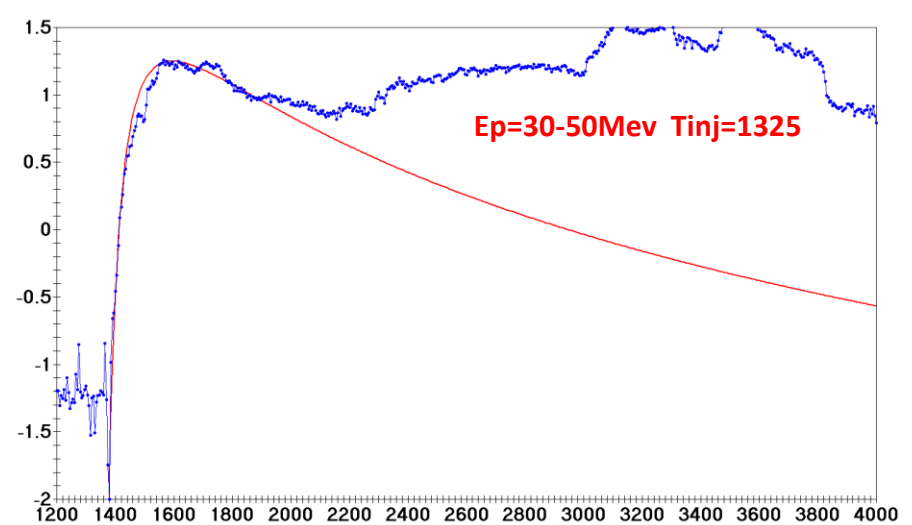
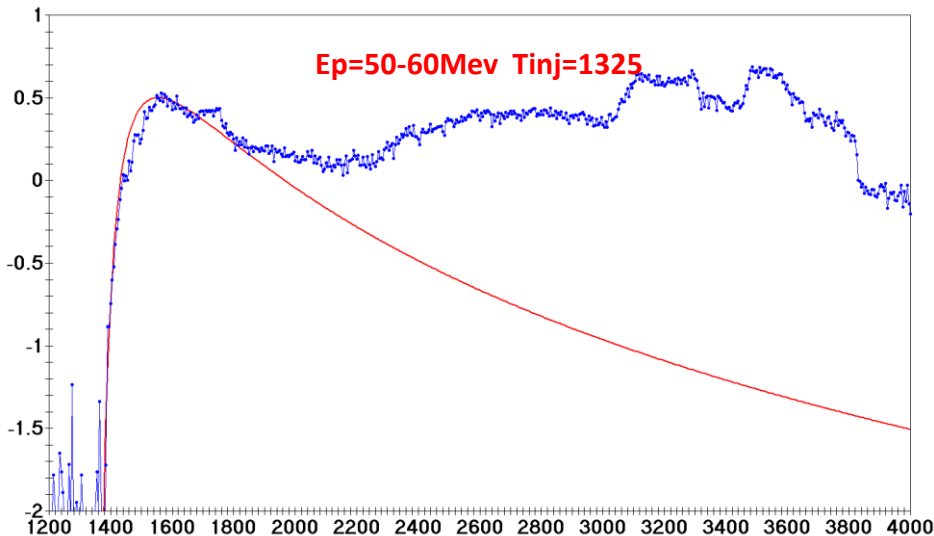
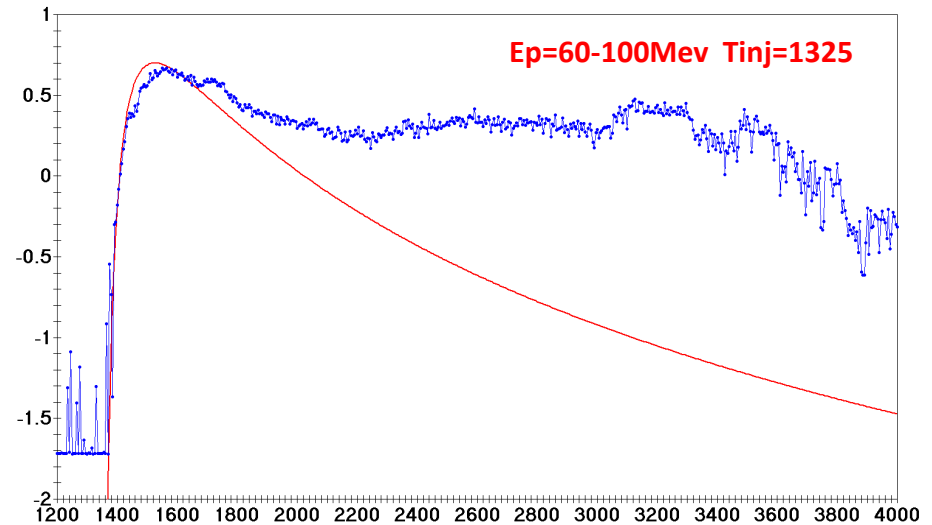
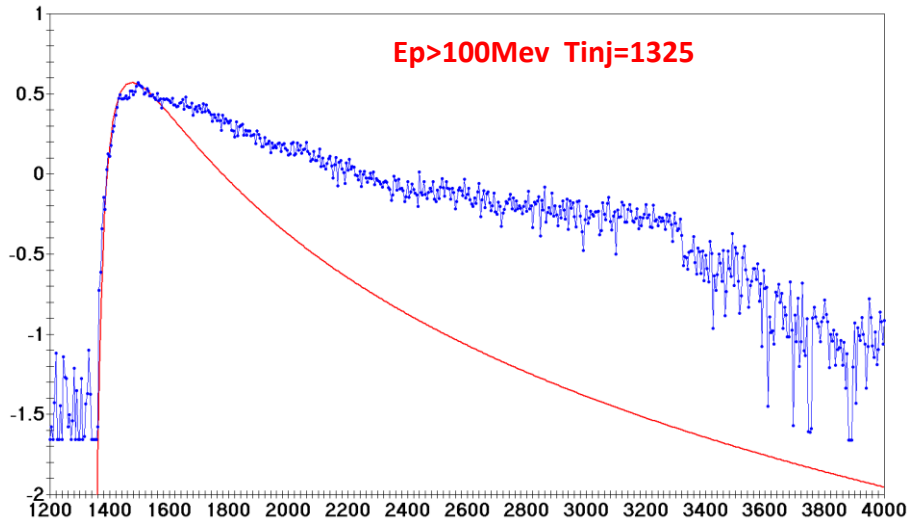
1	1998.08.24	X1.0 N03E09 1302 1324	1	1325	1325	1325	1325	1325	gap	SX
			2	150	200	230	270	370		
			3	0.57	0.7	0.5	1.25	2.17		
2	1998.11.14	C1.3 N28W90* BSL 592 (600)	1	-	-	320	315	315	gap	?
			2	-	-	360	300	260		
			3	-	-	1.02	1.13	0.8		
3	2000.06.10	M5.2 N22W39 992 1014	1	1045	1045	1050	1050	1050	rsx=2.5Ro rsc=6Ro	CME
			2	35	45	40	57	90		
			3	0.21	0.45	0.3	0.83	1.5		
4	2000.10.16	M2.5 n05w90* 392 440	1	440	440	440	440	440	rsx=rsc=5.5Ro	SX
			2	180	180	180	180	180		
			3	-0.63	-0.63	-0.3	0.3	0.71		
5	2001.01.28	M1.5 S04W59 900 952 (992 каталог 1)	1	948	948	948	948		rsx=rsc=2Ro	SX
			2	600	400	350	350			
			3	1.3	0.52	0.16	0.18			
6	2001.10.22	(X1.2 S18E16 ?) 1056 (1071) M6.7 S17E20 900	1	-	894	894	899	899	rsx=rsc=2.5Ro	SX
			2	-	350	350	340	345		
			3	-	0.4	-0.22	0.05 ?	0.05?		
7	2002.08.22	M5.4 S07W62 99 109	1	150	150	150	145	150	rsx=3.5Ro rsc=6Ro	CME
			2	185	125	120	125	105		
			3	1.2	0.67	0.20	0.33	0.27		
8	2003.10.29	X10 S15W02 1229 1241	1	-	-	1235	1235	1235	rsx=2Ro rsc=1.5Ro	SX
			2	-	-	150	115	110		
			3	-	-	2	2.25	2.08		
9	2003.11.02	X8.3 S14W65 1015 1037	1	-	1033	1033	1033	1033	rsx=1.5Ro rsc=Ro	SX
			2	-	160	150	120	90		
			3	-	2.8	1.9	1.73	1.75		
10	2004.11.01	(M1.1 N15W41?) 176 194 CME Phalo 366 v=925	1	360	365	-	-	-	rsc=4Ro	CME
			2	150	100	-	-	-		
			3	0.9	0.65	-	-	-		
11	2005.01.20	X7.1 N12W58 388 413	1	-	400	400	400	400	rsc=5Ro rsc=4Ro	CME
			2	-	35	37	35	28		
			3	-	2.0	2.0	2.53	2.8		
12	2005.06.16	M4 N09W87 1193 1214	1		1200	1197	1197	1195	gap	CME?
			2		220	210	190	165		
			3		0.83	0.38	0.63	0.48		

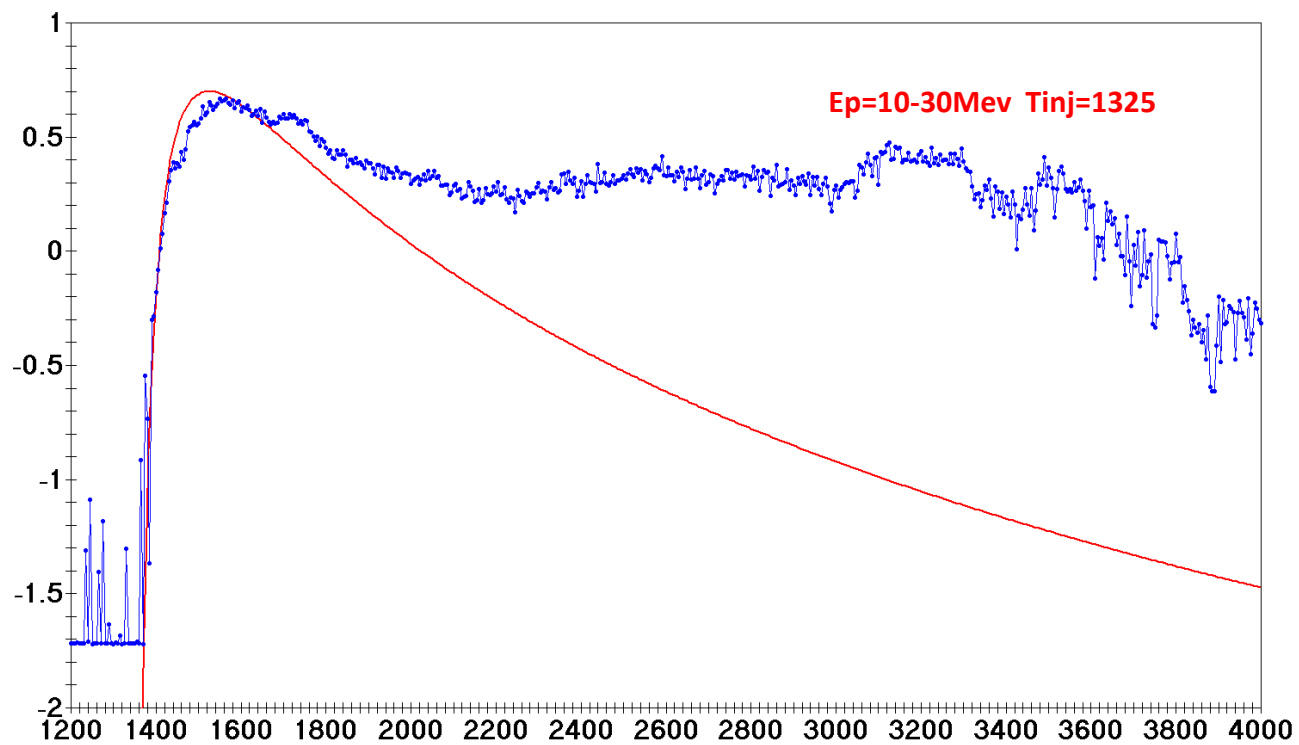
1998.08.24 N03E09 X1.0 $t(SX) = T_{max}(SX) - 8min = 1324$ $rsx = R_o$

SCr+

ось Y : $lgJp$ (част/ см²с ср), ось X : время в мин.(0соотв 00час 24.08.1998)

$T_{inj}(sc) = 1325$ $rsc = R_o$ SX



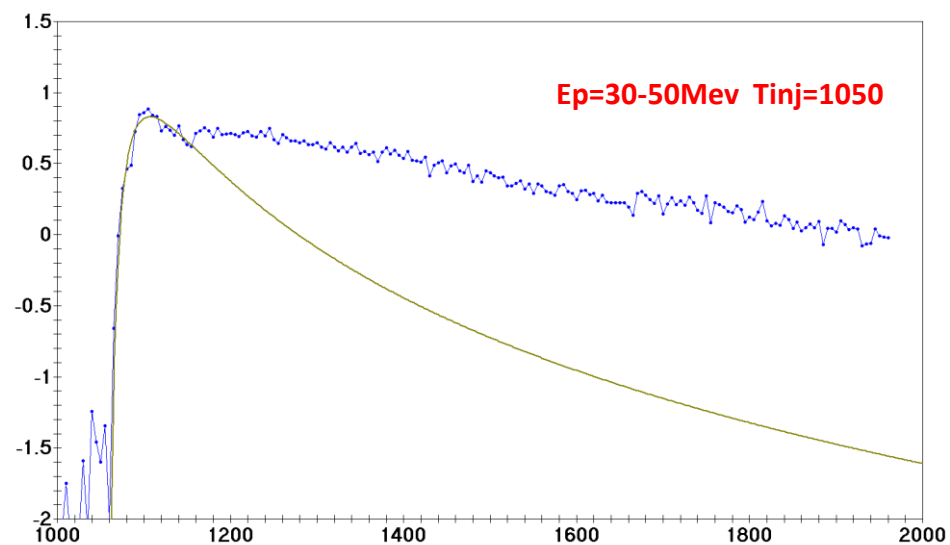
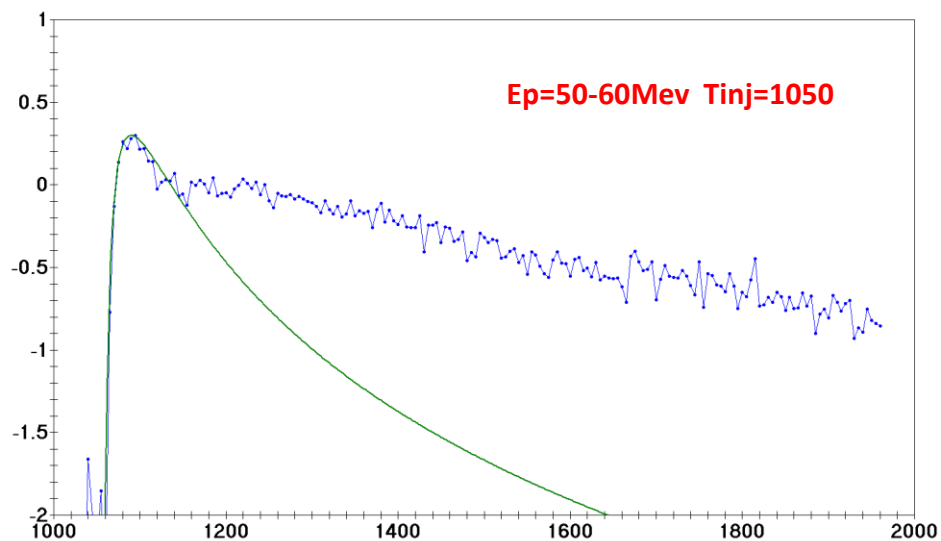
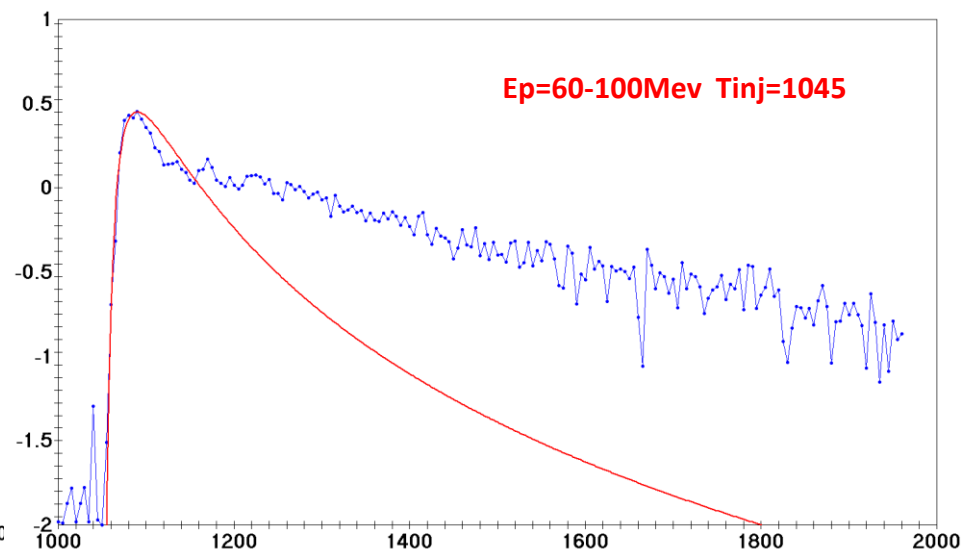
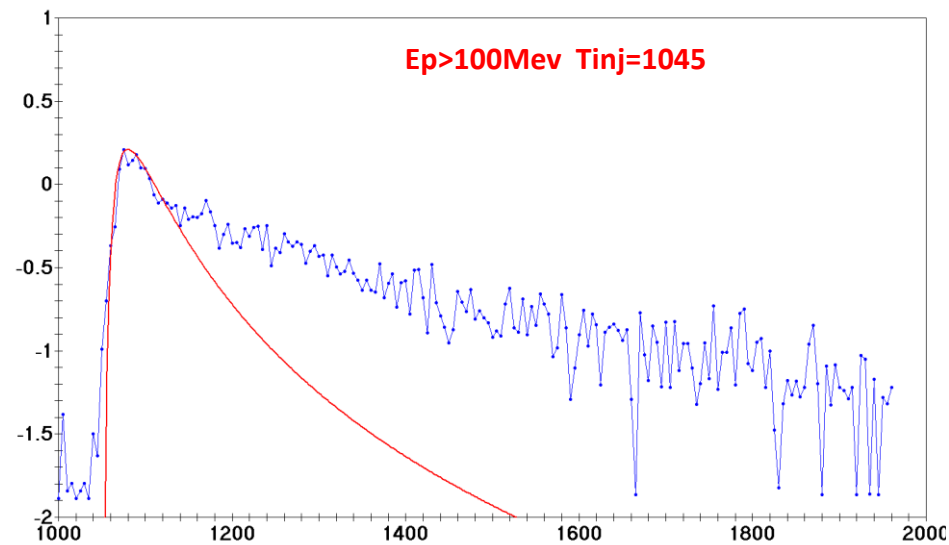


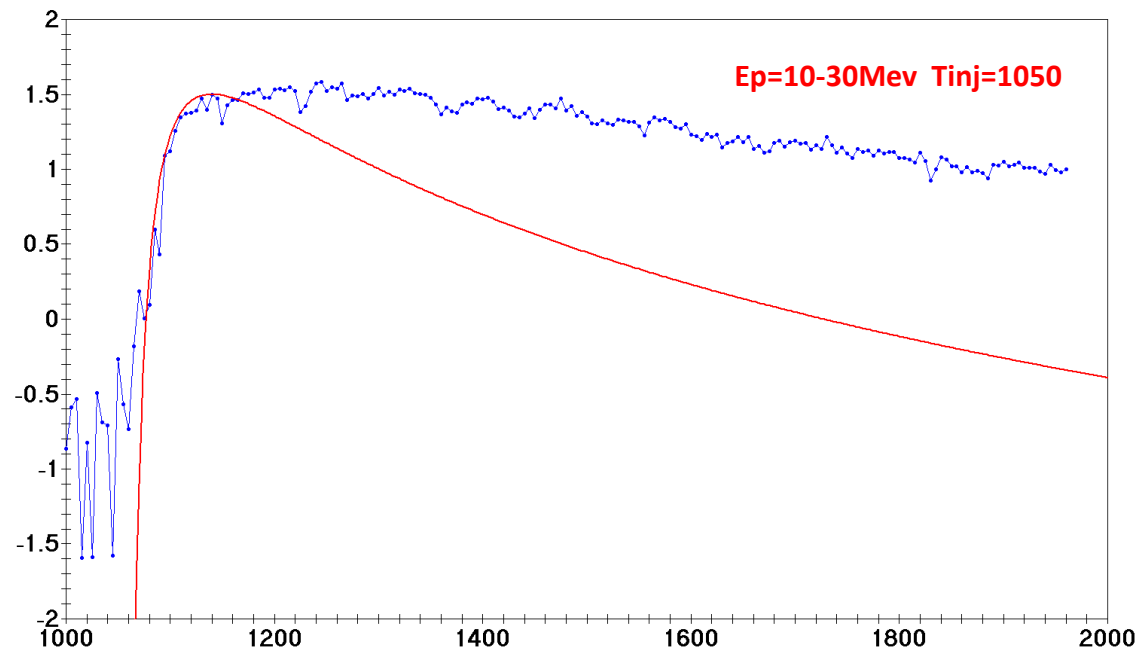
2000.06.10 N22W39 M5.2 $t(SX) = T_{max}(SX) - 8min = 1014$ $rsx = 2.5R_o$

SCr+

ось Y : $lgJp$ (част/ см²с ср), ось X : время в мин.(0соотв 00час 10.06.2000)

$T_{inj}(sc) = 1045$ $rsc = 6 R_o$ CME



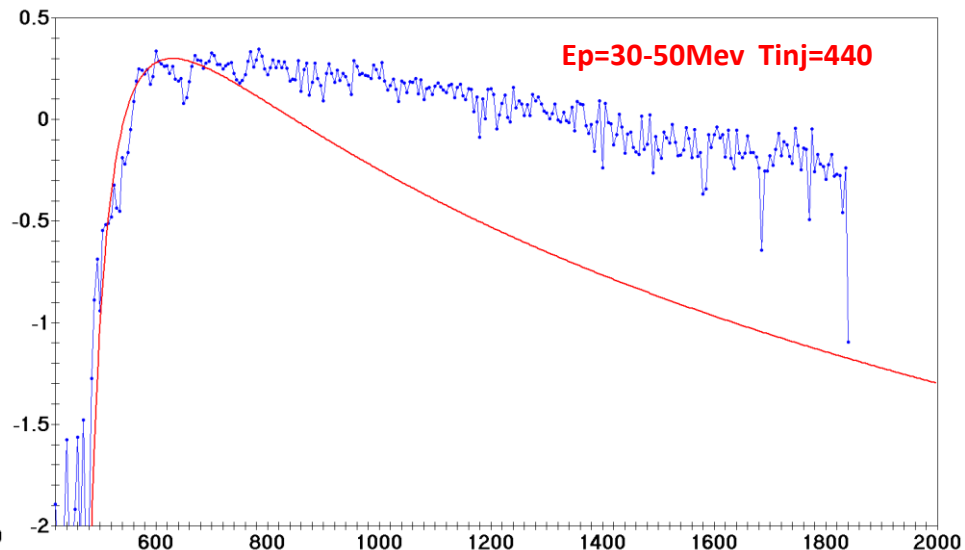
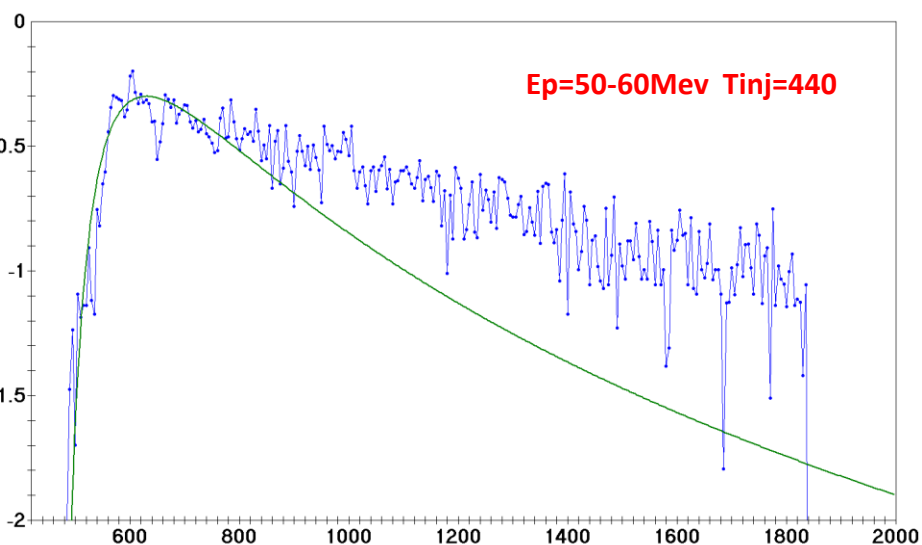
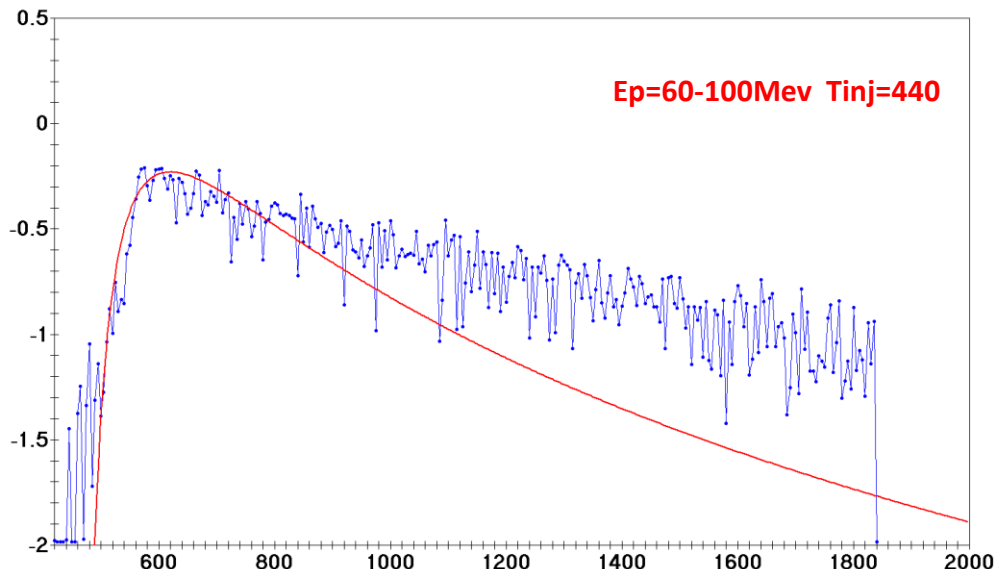
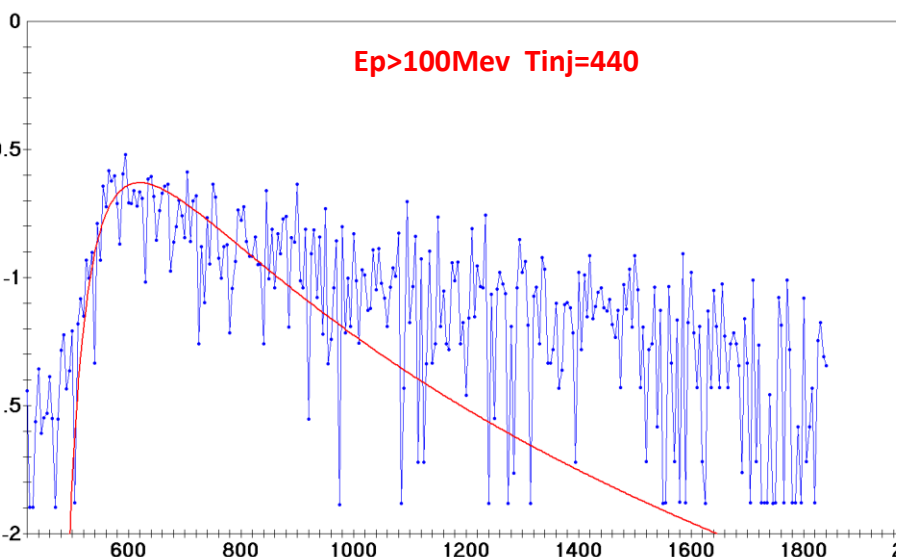


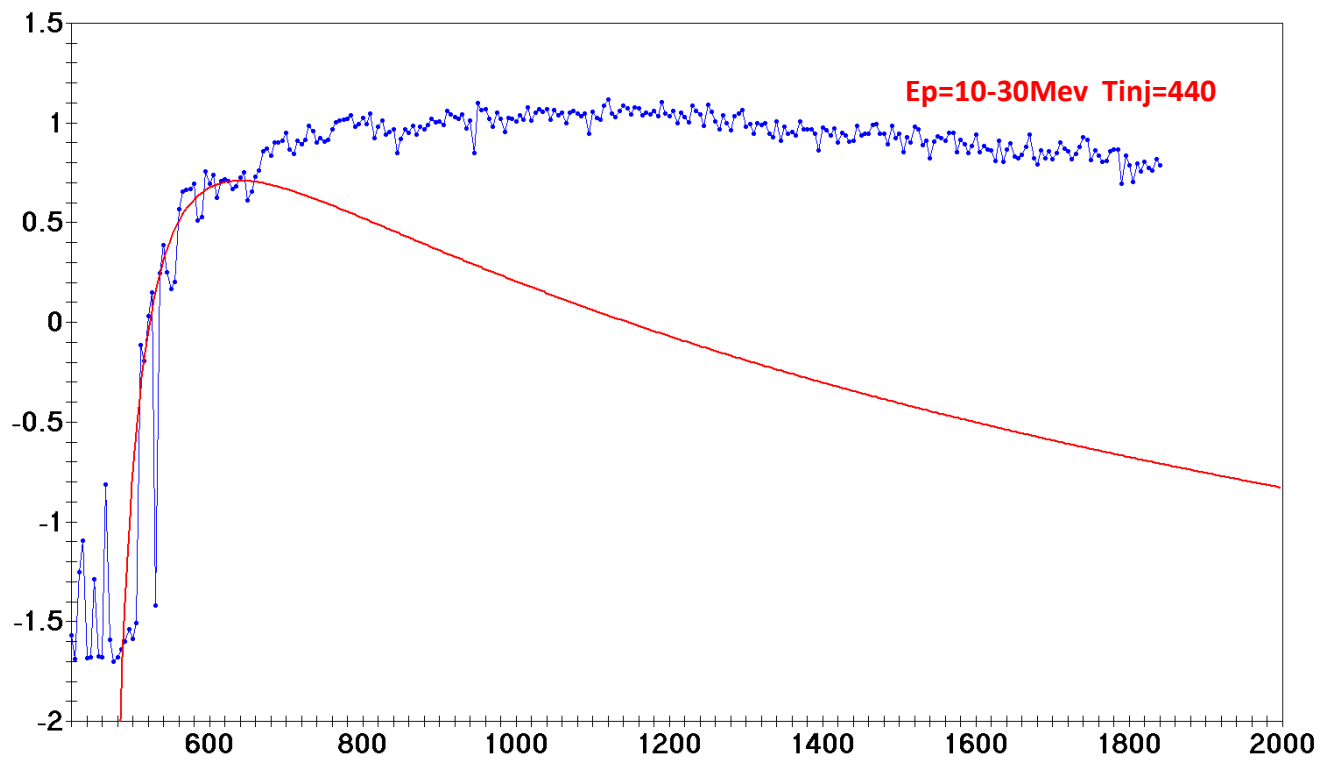
2000.10.16 n22w90* M2.5 t(SX)= Tmax(SX) -8min=440 rsx= 5.5Ro

ось Y : lgJp(част/ см2с ср), ось X : время в мин.(0соотв 00час 10.06.2000)

SCr+

Tinj(sc)=440 rsc= 5.5Ro SX



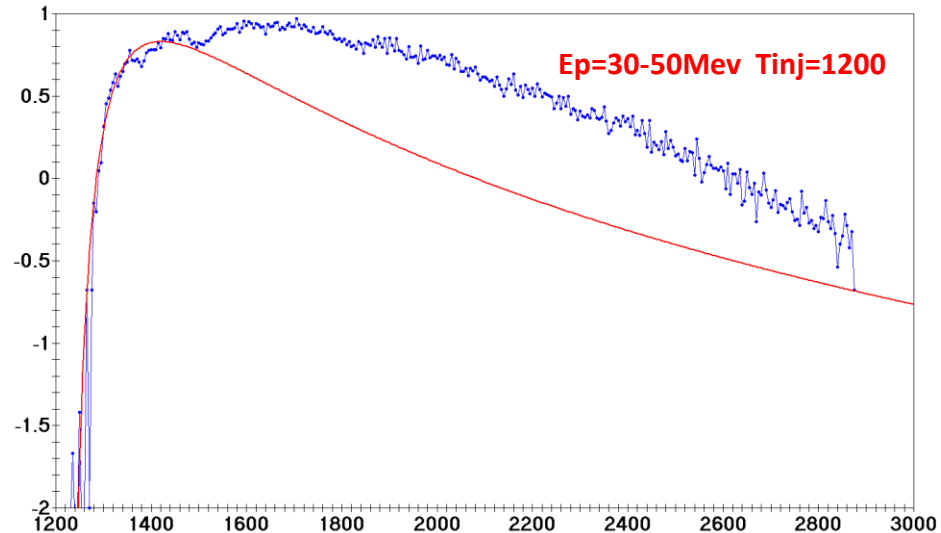
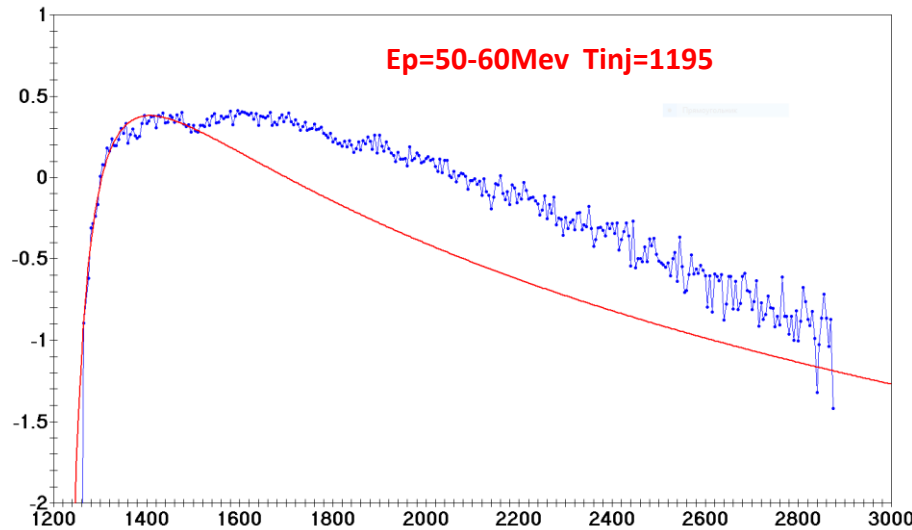
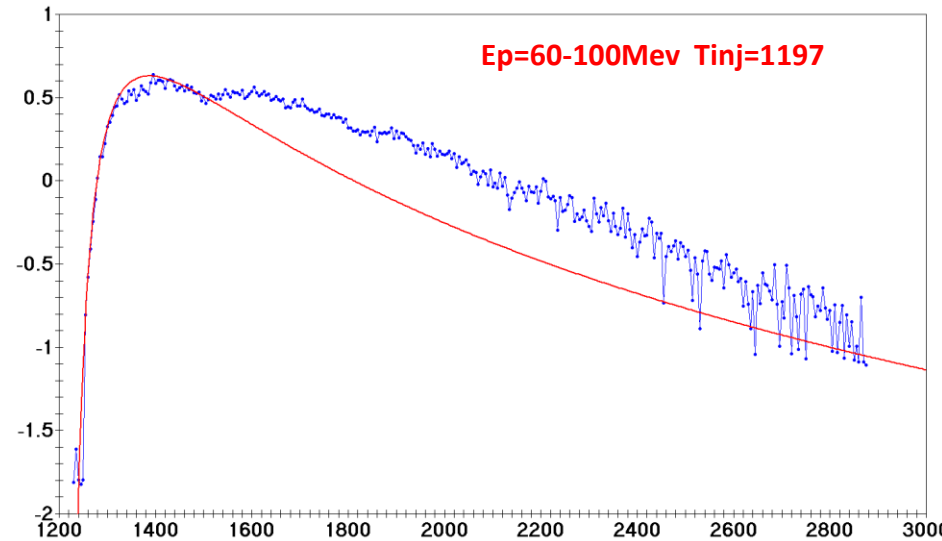
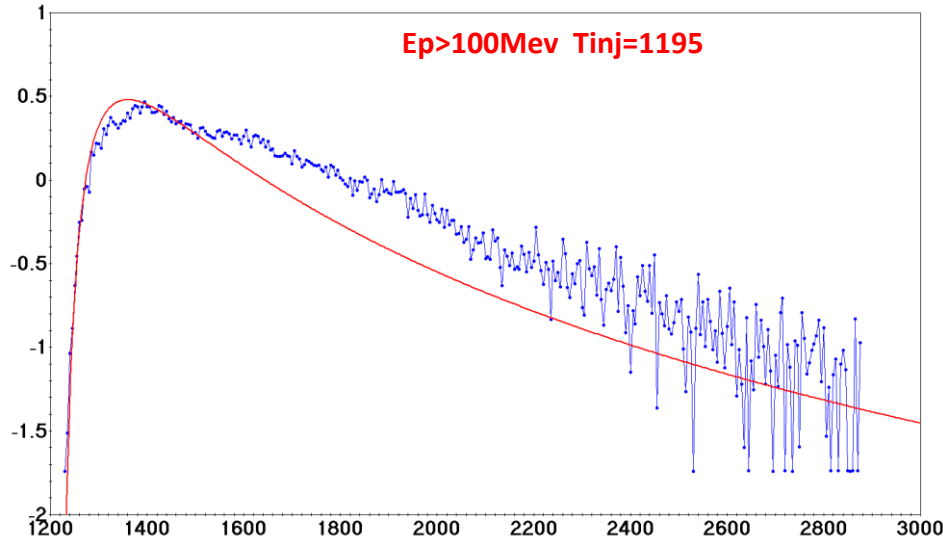


2005.06.16 N09W87 M4.0 $t(SX) = T_{max}(SX) - 8min = 1214$ gap

SCr+

ось Y : $\lg J_p$ (част./ см²с ср), ось X : время в мин. (0 соотв 00 час 10.06.2000)

$T_{inj}(sc) = 1195$ gap CME?



События со скейлингом на фазе роста (обозначение событий: SCr) (8из 51)

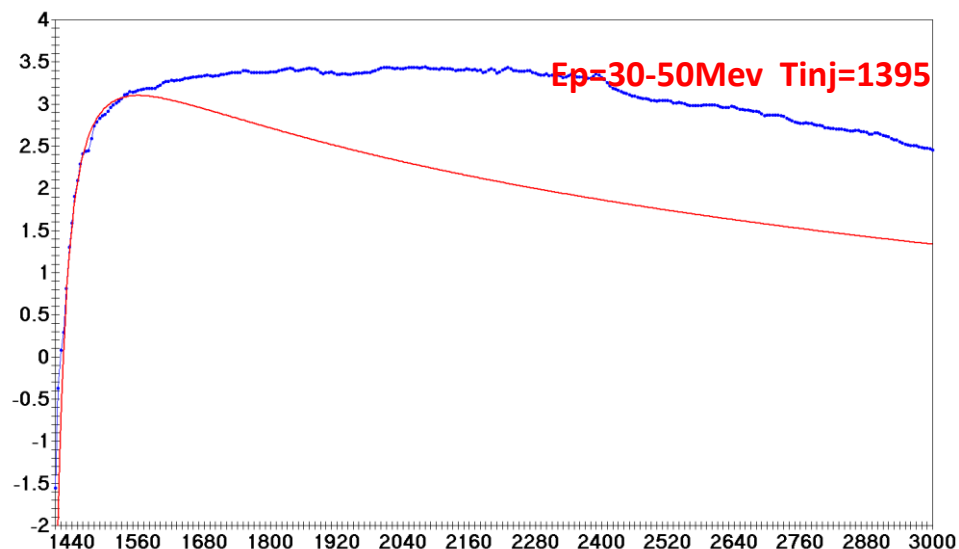
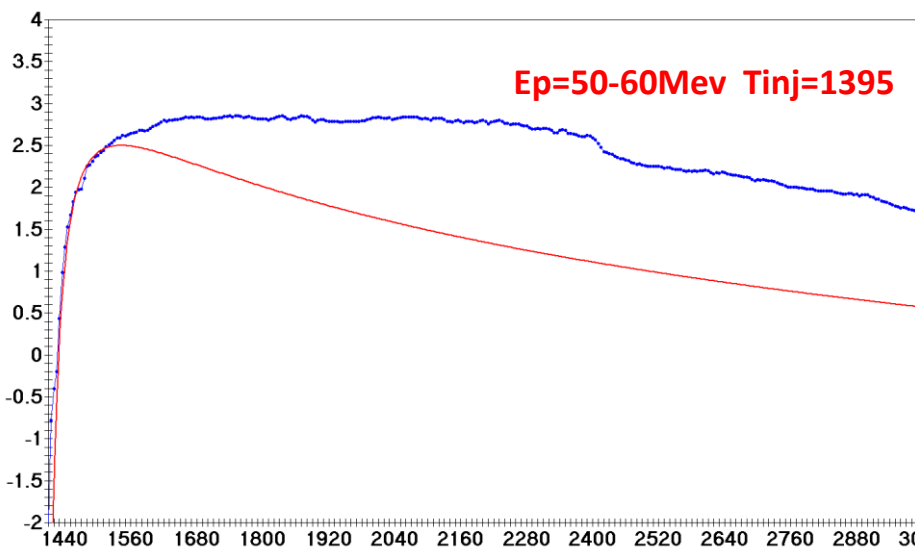
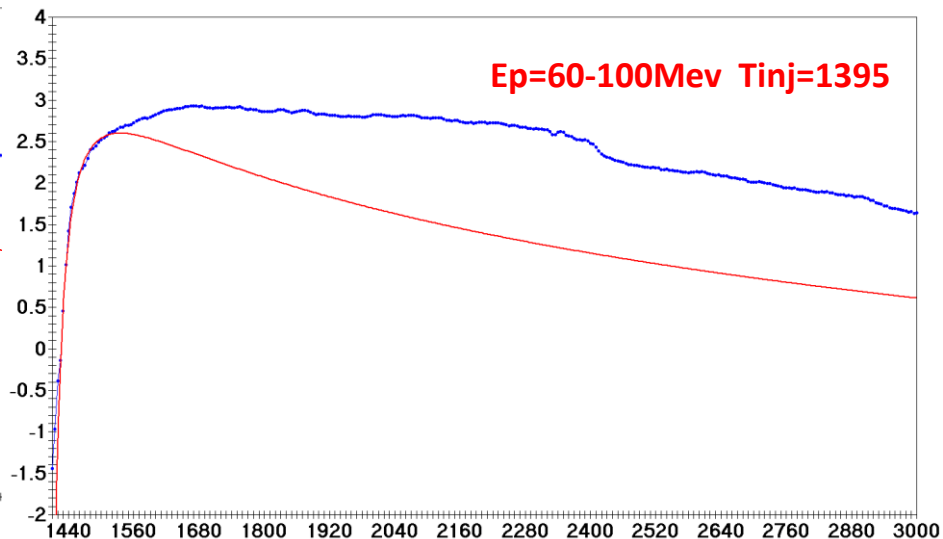
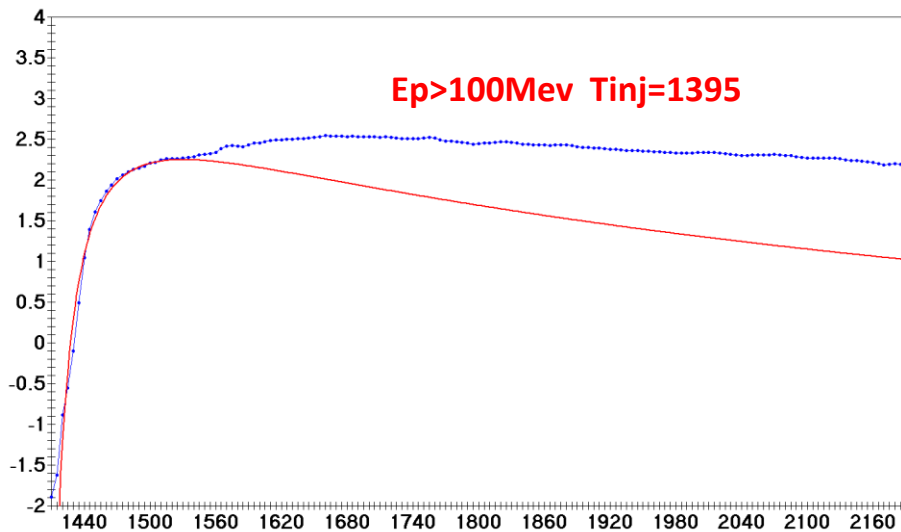
№	Дата	Класс,координаты Время начала и макс. SX (солн.вр., мин.)	Ер: 10-30 30-50 50-60 60-100 >100 1. T_{inj} 2. $\Delta t_m = T_m - T_{inj}$ 3. lgJ_m	rsx rSC	Инжекция
1	1998.05. 02	X1.1 S15W15 803 814	1 - 822 822 822 822 2 - 85 80 70 50 3 - 0.8 0.45 0.84 0.184	rsx=2.7Ro rsc=3.5Ro	CME
2	1998.05. 06	X2.7 S15W64 470 481	1 490 490 490 490 490 2 75 75 65 50 35 3 2.3 1.3 0.62 0.70 0.48	rsx=1.5Ro rsc=2.7Ro	CME
3	2000.07. 14	X5.7 N22W07 595 616	1 - 610 610 610 610 2 - 160 130 150 135 3 - 2.3 2.55 2.45 2.55	rsx=rsc=0.5- 1Ro	SX
4	2000.11. 08	M7.4 N20W68 1354 1400	1 1395 1390 1395 1395 1395 2 180 170 147 140 135 3 3.4 3.1 2.5 2.6 2.25	rsx=rsc=6.3Ro	SX
5	2000.11. 24	X2.0 N20W05 287 294	1 295 295 295 - - 2 380 330 360 - - 3 0.67 0.1 0.67	rsx=rsc=0.2Ro	SX
6	2001.11. 04	X1.0 N07W19 955 972	1 - 975 975 975 975 2 - 175 155 145 105 3 - 1.6 1.2 1.57 1.6	rsx=rsc=2.7Ro	SX
7	2004.11. 07	X2.0 n10w15* 934 958	1 958 958 958 958 958 2 590 530 450 430 390 3 1.2 0.67 0.20 0.33 0.27	rsx=rsc=0.1Ro	SX
8	2005.01. 16	X2.6 N14W08 1337 1374	1 1373 1374 1374 1369 1369 2 390 385 390 390 370 3 1.43 0.68 0.085 0.07 0.40	rsx=rsc=6Ro	SX

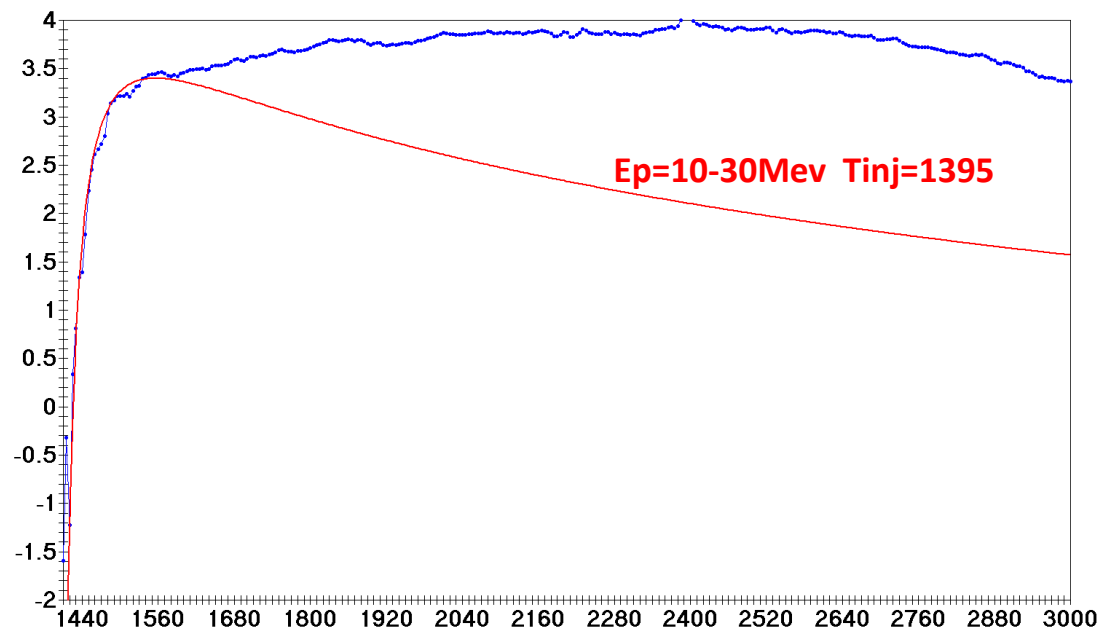
2000.11.08 M7.4 W66 $t(SX) = T_{max}(SX) - 8min = 1440$ $r_{sx} = 6.5R_o$

SCr

ось Y : $lgJp$ (част/ см²с ср), ось X : время в мин.(0соотв 00час 08.11.2000)

$T_{inj}(sc) = 330$ $r_{sc} = 6.5R_o$ SX





Список событий со скейлингом на части фазы роста (имеется хорошо выраженный излом временного хода) (обозначение событий: SCr-):

- | | | |
|---------------|--------------|---------------|
| 1. 1998.04.20 | 4.2001.09.24 | 7. 2005.01.16 |
| 2. 1998.05.02 | 5.2002.04.21 | |
| 3. 2001.04.18 | 6.2004.11.07 | |

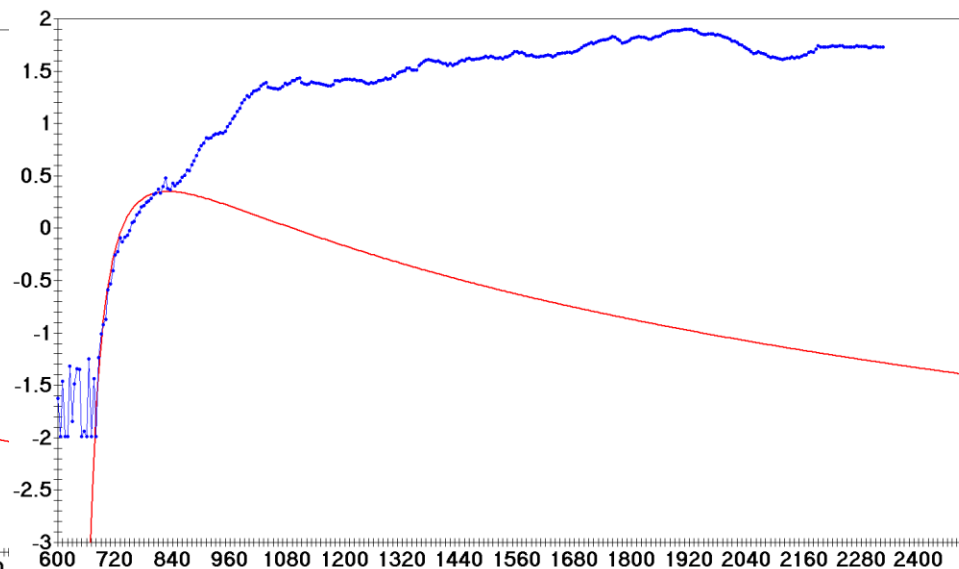
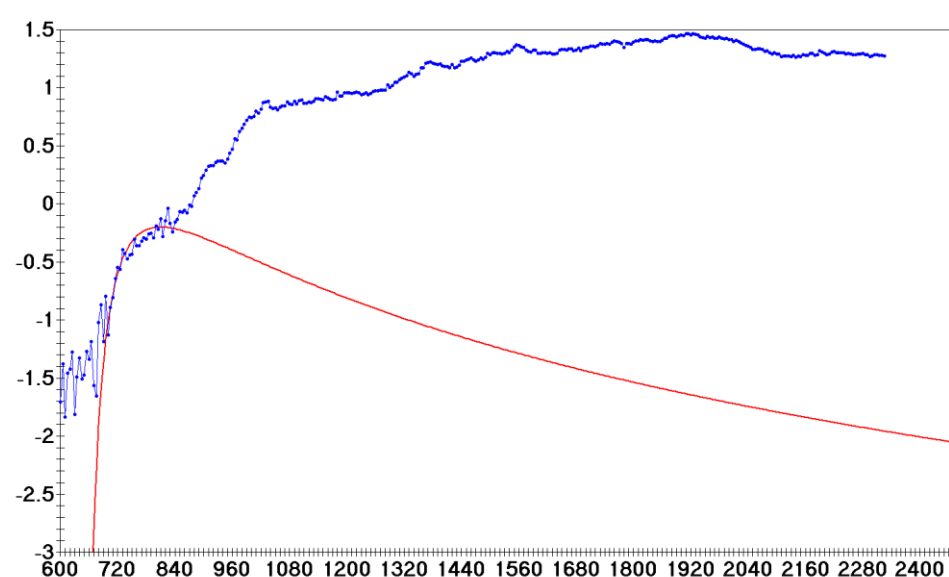
SCr-

2001.09.24 Tsx-8=630

Tinj(100MeV)=630

SX

Tinj(60-100MeV)=630

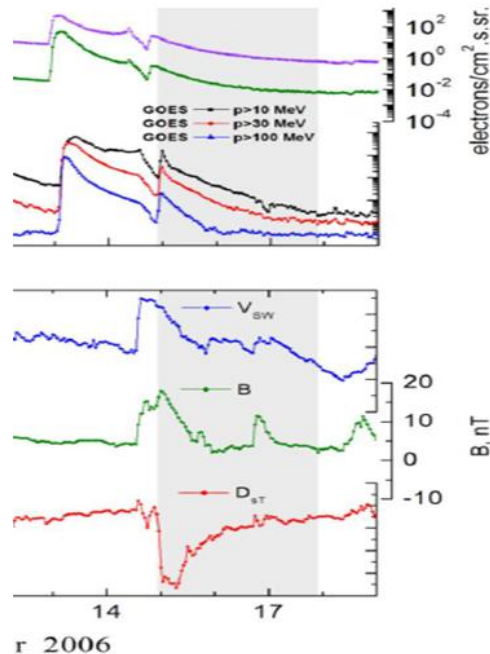


Список событий с отсутствием скейлинга:

1. 2001.08.16 5 дней за лимбом
2. 2002.11.09 M4.6 S04W49 возмущение В
3. 2004.11.10 M8.9N07W51 возмущение В
4. 2005.01.17 X3.8 N14W14 возмущение В
5. 2005.07.14 X1.2 n11w90* за лимбом
6. 2006.12.06 X6.5 S06E63
7. 2006.12.14 X1 S06W48 возмущение В

Среди этих событий два залимбовых, одно от восточной вспышки (E=63).
У остальных - максимум во время сильных магнитных возмущений.

2006.12.14



Основные результаты исследования

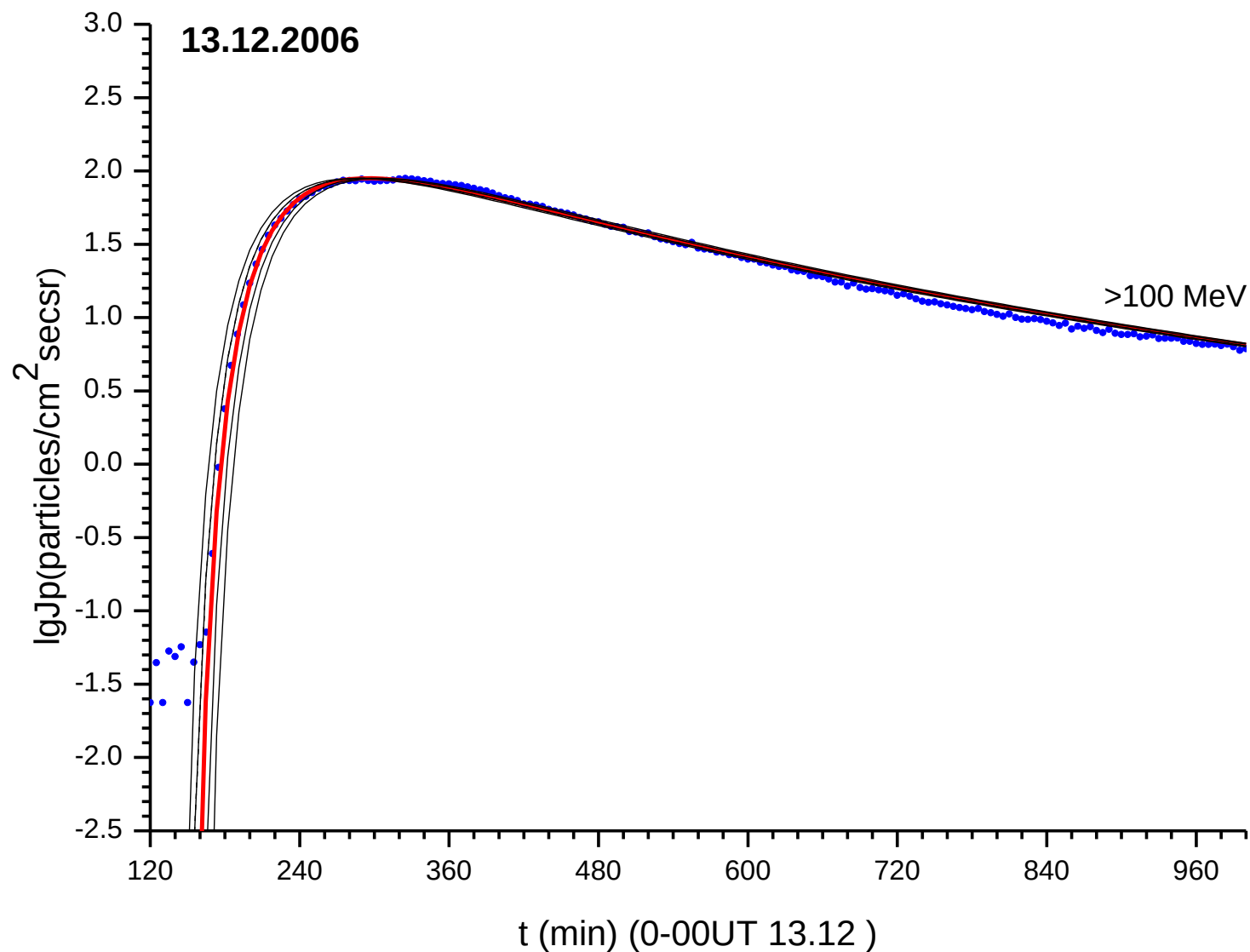
Из 51 события только 7 не удовлетворяют скейлингу. Во всех событиях момент инжекции одинаков для всех энергий от 10 до 100 МэВ. Из 39 событий, с уверенной привязкой к вспышкам в 27 случаях момент инжекции совпадает с максимумом рентгеновской вспышки (0.1-0.8 нм) (SX события). В 12 случаях момент инжекции отличается от момента максимума рентгеновской вспышки на 10-40 минут (в 6 случаях раньше и в 6 случаях позже максимума вспышки) и связан, по-видимому, с распространением KBM (CME события). Всего построены 196 временных ходов для разных энергий и событий, которые хорошо описываются одной функцией (либо только на фазе роста, либо на фазе роста и значительном интервале времени на фазе спада). Для малых энергий отмечается наличие длительной инжекции, начало которой совпадает с мгновенной инжекцией для высоких энергий, и продолжительностью несколько часов.

Обсуждение результатов

Следует сделать вывод о том, что скейлинг определяет временное развития СПС в период распространения диффузионного фронта от Солнца к Земле для подавляющего большинства событий (по крайней мере для событий от западной половины диска). Скейлинг позволяет определить время инжекции с точностью до 5 минут и в ряде случаев осуществить более правильную привязку к событиям на Солнце. Совпадение моментов инжекции с максимумом рентгеновской вспышки нельзя считать случайным (из-за большого количества случаев), отсюда следует, что вспышки играют важную роль в инжекции протонов. В них либо происходит ускорение протонов, либо они способствуют выходу протонов из ловушки, которые образуют KBM. В ряде событий можно с уверенностью утверждать, что инжекция происходит при распространении KBM (см. также *Очелков Ю.П. Известия РАН, серия физическая, 2021, том 85, № 8, с.1189–1193.*) и вспышки не связаны с инжекцией протонов.

Спасибо за внимание

Пример масштабноподобного временного профиля



$T_{inj}=135$ минут, тонкие линии: $T_{inj} \pm 5$ минут, $T_{inj} \pm 10$ минут

СПС 1961.09.28 > 23 МэВ N13E29 T_{opt,max}=22:23 (22.38) Krimigis

28.09.61 >23 MeV Krimigis Ha(N13 E29) T_{opt,max}=22:23 (22.38) T_{hx,max}=22:17 (22.28) $\lg J = 1.63 + 3 * (-\text{LG}((X-22.0)/3.5) + (1-3.5/(X-22.0))/\text{LN}(10))$

