



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



Основан в 1956 г.

Сравнение результатов определения времени начала инжекции солнечных протонов в СПС со скейлингом с результатами их определения по начальным измерениям потоков протонов.

Очелков Ю.П.

38 Всероссийская конференция по космическим лучам

Масштабное подобие (масштабная инвариантность) СПС

В работах [1-4] показано, что временное развитие СПС обладают масштабной инвариантностью (скейлингом). Это означает, что если изменить масштаб по интенсивности (путем деления величины интенсивности на величину интенсивности в максимуме) и по времени (путем деления времени на величину времени достижения максимума в событии СПС), то временной ход всех событий будет одинаковый как для отдельных событий, так и для разных энергий протонов СПС (в диапазоне от 10 до 160 МэВ). В [3] показано, что подавляющее число СПС (в диапазоне от 10 до 160 МэВ) (в 23 цикле 44 из рассмотренных 51) удовлетворяют скейлингу.

В [1-2] было показано, что масштабноподобное распространение протонов для целого ряда событий хорошо описывается функцией: $J(t) = J_m \left(\frac{\Delta T_m}{\Delta t} \right)^3 e^{(3-3\frac{\Delta T_m}{\Delta t})}$ /1/,

где $\Delta t = t - T_{inj}$ – время , отсчитываемое от момента инжекции. Функция /1/ соответствует решению диффузионного уравнения в трехмерном пространстве с коэффициентом диффузии, который **всегда зависит от расстояния по линейному закону $k = k_0(r/r_0)$** , где r_0 - радиус Солнца (в отличие от ранее принятых взглядов, когда зависимость от расстояния отличалась для каждого события и зависела также от энергии протонов). В этом случае $\Delta T_m = t_m - T_{inj} = \frac{r}{3k_0 r_0}$, $J_m = J_{m,0} \frac{r_0^3}{r^3}$, а длина свободного пробега $l = l_0 r/r_0$.

1. Очелков Ю.П. Масштабное подобие развития солнечных протонных событий. Гелиогеофизические исследования, выпуск 19, 47 – 74, 2018

2. Очелков Ю.П. Определение момента инжекции протонов в солнечных протонных событиях по их временному ходу // Известия РАН, серия физическая, 2021, том 85, № 8, с. 1189-1193

3. Yu.P. Ochelkov *The Scale Similarity of Solar Proton Time Profiles in the 23 rd Solar Cycle.. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2023, Vol.87, No 7, pp. 1066-1070 DOI:10.3103/S106287382370243X*.

4. Ю. П. Очелков Масштабное подобие временного развития солнечных протонных событий в 23 цикле солнечной активности. Гелиогеофизические исследования. выпуск 37, 16 – 41, 2023

Если подставить /1/ в уравнение для распространения протонов /2/, то можно получить оценки различных членов.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_r r^2 \frac{\partial n}{\partial r} \right) - \frac{V}{r^2} \frac{\partial (r^2 n)}{\partial r} - \frac{2V}{3r} \frac{\partial}{\partial T} (\alpha T n) \quad /2/$$

где $\alpha = (T + 2E_0)/(T + E_0) \approx 2$, n -концентрация протонов, γ - показатель энергетического спектра протонов, V – скорость солнечного ветра, k_r - коэффициент продольной диффузии, T - кинетическая энергия частиц, E_0 масса покоя протона.

$$\frac{\partial n}{\partial t}_{diff} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_0 \frac{r^3}{r_0} \frac{\partial n}{\partial r} \right) = 3n/T_V \left(\frac{T_V}{\Delta T_m} \right) \frac{1}{\tau} \left(-1 + \frac{1}{\tau} \right);$$

$$\frac{\partial n}{\partial t}_{conv} = - \frac{V}{r^2} \frac{\partial (r^2 n)}{\partial r} = 3n/T_V \left(-\frac{2}{3} + \frac{1}{\tau} \right);$$

$$\frac{\partial n}{\partial t}_{adiab} = -2/3 \frac{V}{r} \frac{\partial (\alpha T n)}{\partial T} = 3n/T_V 4/9 (\gamma - 1/2);$$

где $\tau = t/\Delta T_m$, $T_V = R_0/V$, R_0 -расстояние до Солнца

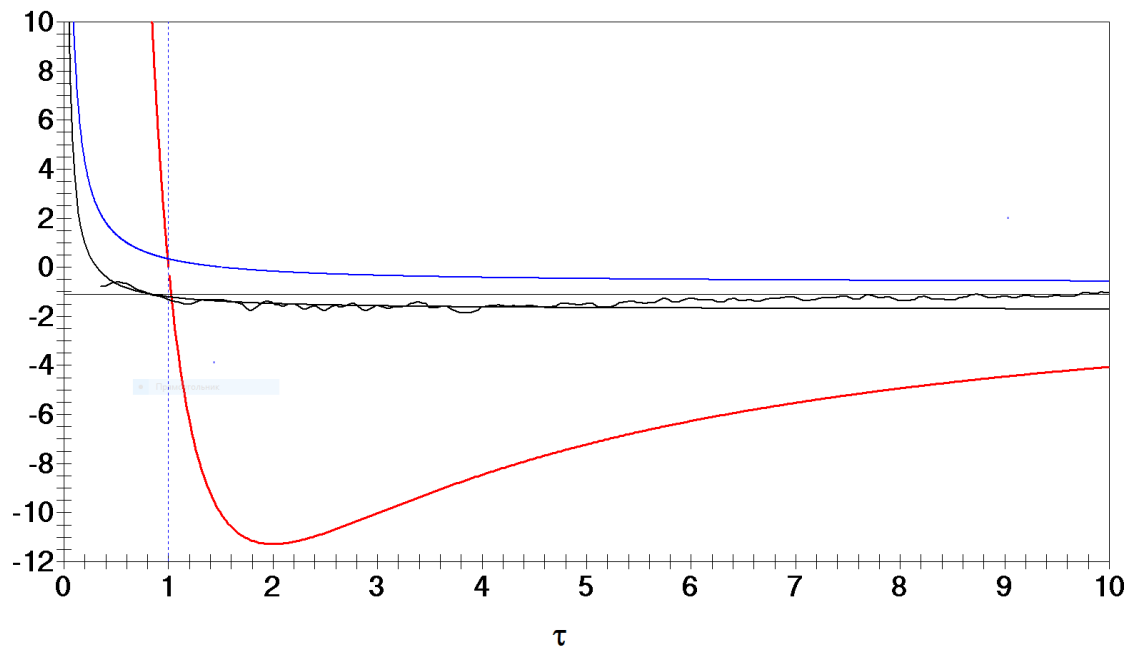


Рис1а.

Рис.1а Событие 2000.07.22. Отношение $Tv / \Delta Tm = 43.7$, $V=400$.

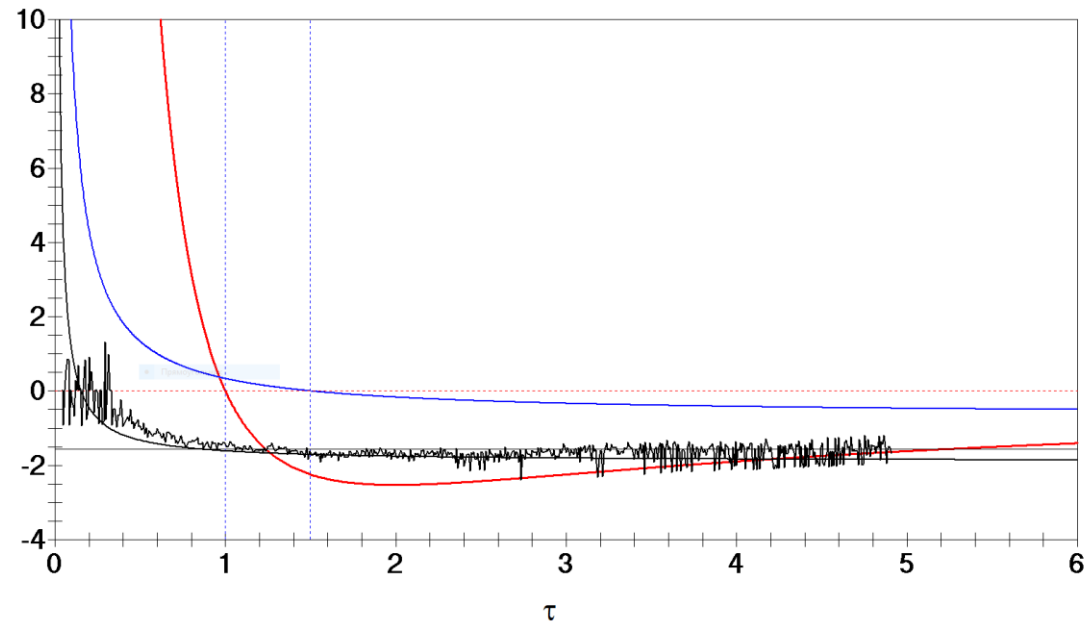


Рис1б.

Рис.1б Событие 2001.04.18. Отношение $Tv / \Delta Tm = 26.4$, $V=700$.

Красная кривая dn/dt_{diff} , синяя кривая dn/dt_{conv} , черная гладкая кривая dn/dt_{adiab} при аппроксимации γ по масштабному подобию (черная с флуктуациями - для реального значения γ , прямая для γ_{max} по максимальным значениям J)

Как видно из рисунков, член, описывающий диффузию, значительно превышает остальные.

Масштабное подобие временного развития СПС позволяет по временному ходу определять время инжекции протонов (что важно для ответа на вопрос ,где они ускоряются),а также позволяет надежно прогнозировать временное развитие потоков протонов, что важно для прогноза радиационной обстановки.

В данной работе проведено сравнение времен инжекции, определенных с использованием масштабного подобия СПС с результатами работ [5,6], в которых было определено время инжекции релятивистских протонов в событиях GLE с помощью метода дисперсии скорости [5] и по первому наблюдению на нейтронных мониторах и с учетом зависимости длины силовой линии Солнце-Земля от скорости солнечного ветра [6] .

Было исследовано 13 событий (те же, что и в [5] : GLE 56-61, GLE 63-67, GLE 69-70) для энергетических интервалов: 40-80 МэВ, 80-165 МэВ, 165-500 МэВ - с минутным усреднением по времени и для энергетических интервалов : 30-50 МэВ, 50-60МэВ, 60-100 МэВ, >100 МэВ - с пятиминутным усреднением по данным КА GOES <https://ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/dataaccess.html> и построено 78 временных ходов, по которым момент начала инжекции может быть определен с точностью до 1 минуты. Временной ход для этих событий и его аппроксимация с помощью функции (1) приведены на рисунках 1-13.

Вообще говоря, время инжекции для протонов СПС и релятивистских протонов могут отличаться друг от друга , кроме того каждый метод имеет свои недостатки в определении времени инжекции.

5. D.V.Reames . Solar release times of energetic particles in ground-level events. The Astrophysical Journal, 2009, v693,pp.812-821. DOI:10.1088/0004-637X/693/1/812
6. G.A.Bazilevskaya. On the early phase of relativistic solar particle events: Are there signatures of acceleration mechanism? Advances in Space Research, 2009, 43, pp.530-536.

Для всех 13 событий в данной работе построены рисунки временного хода потоков протонов разной энергии в СПС (6 временных ходов на каждом рисунке).

На верхней панели всех рисунках использованы рисунки из работы [7] (в основе которых положены результаты [5]). На них обозначены красной кривой временной ход вспышки мягкого рентгеновского излучения (1-8 А сплошная линия, 0.5 -4А пунктирная линия), черной линией – временной ход жесткого рентгеновского излучения (производная от временного хода излучения 1-8 А, пунктир – производная от временного хода излучения 0.5-4А). Вертикальная пунктирная линия момент времени наблюдения всплесков II типа. Косой пунктир-время инъекции релятивистских протонов по работе D.V.Reames (с погрешностями определения момента начала инъекции).

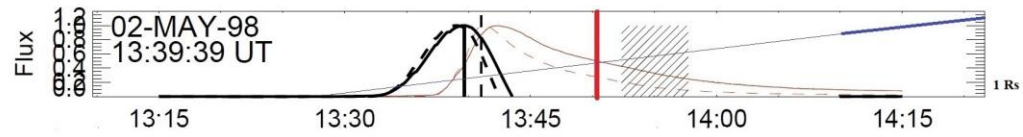
На эти рисунки нанесены данные из других работ: сплошная синяя –время инъекции релятивистских протонов по [6], красная –время инъекции, определенное по масштабному подобию СПС, найденное в данной работе. Наклонная прямая - зависимость положения коронального выброса от времени (аппроксимация тонкая линия и наблюдение - толстая (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/), шкала на правой части – расстояние от Солнца).

Время всех явлений на верхней панели - это время наблюдения их у Земли (время инъекции протонов сдвинуто на 8.3 минуты вправо по шкале). На графиках временного хода - время инъекции на Солнце.

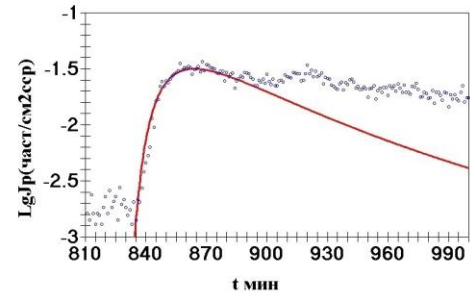
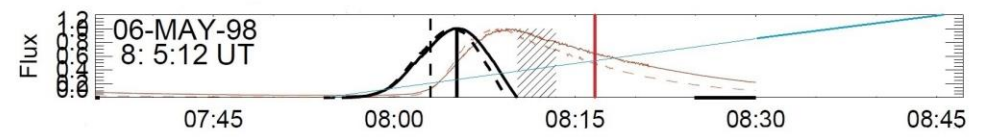
5. D.V.Reames . Solar release times of energetic particles in ground-level events. The Astrophysical Journal, 2009, v693,pp.812-821. DOI:10.1088/0004-637X/693/1/812

6. G.A.Bazilevskaya. On the early phase of relativistic solar particle events: Are there signatures of acceleration mechanism? Advances in Space Research, 2009, 43, pp.530-536.

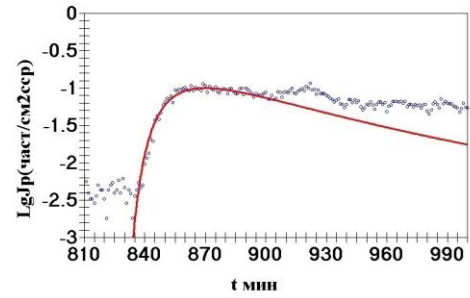
7. M.J. Aschwanden .GeV Particle Acceleration in Solar Flares and Ground Level Enhancement (GLE) Events, arXiv:1005.0029v5 [astro-ph.SR] 20 Dec 2011



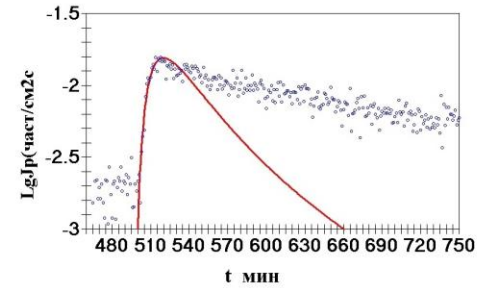
a)



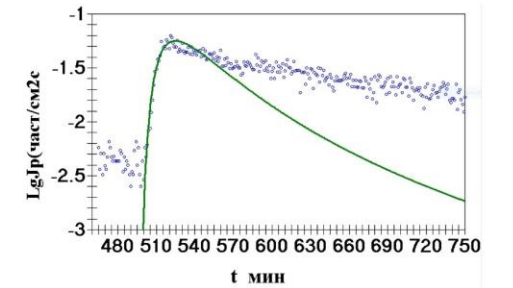
b) 165-500 MeV Tinj=13:42



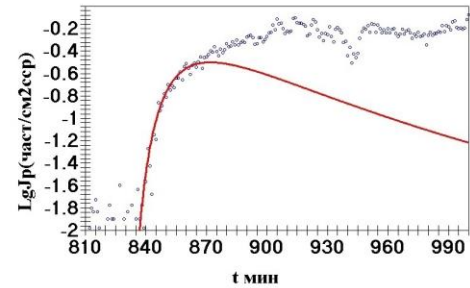
c) 80-165 MeV Tinj=13:42



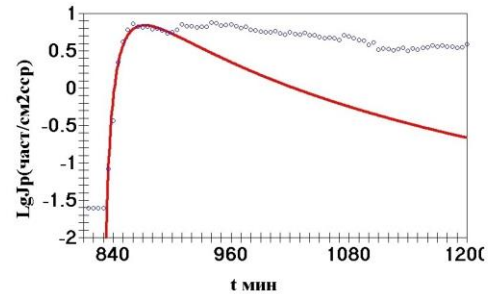
b) 165-500 MeV Tinj=08:10



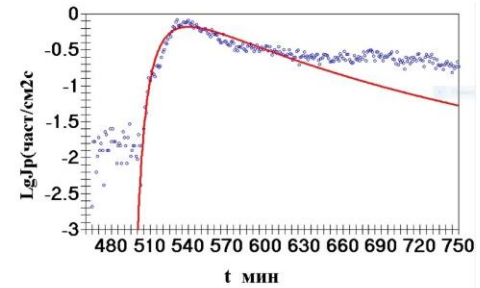
c) 80-165 MeV Tinj=08:10



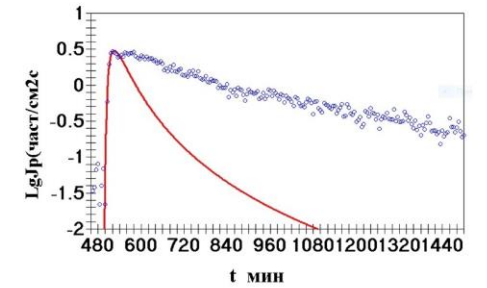
d) 40-80 MeV Tinj=13:42



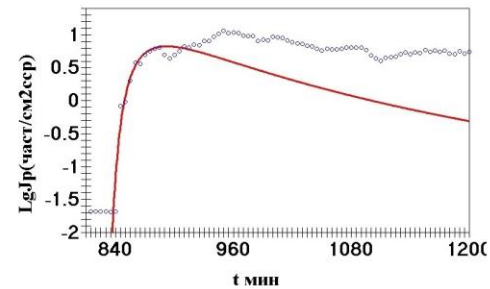
e) >100 MeV Tinj=13:42



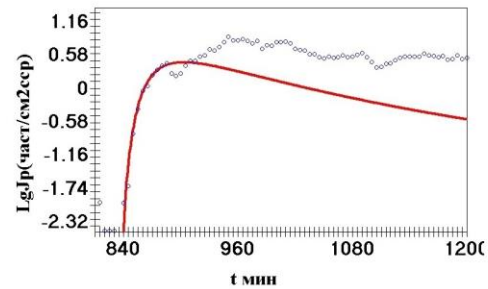
d) 40-80 MeV Tinj=08:10



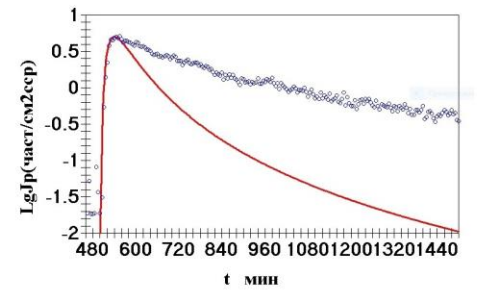
e) >100 MeV Tinj=08:10



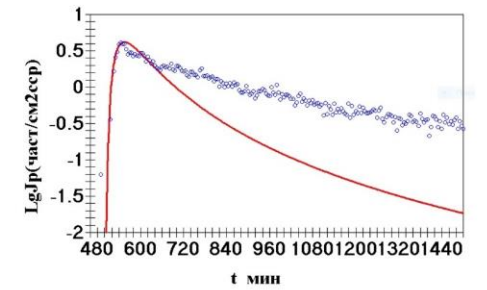
f) 60-100 MeV Tinj=13:42



g) 50-60 MeV Tinj=13:42



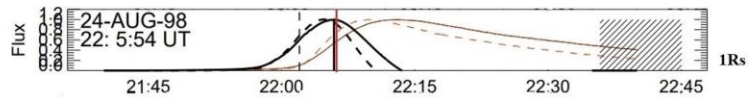
f) 60-100 MeV Tinj=08:10



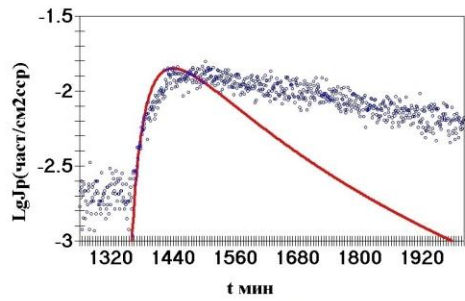
g) 50-60 MeV Tinj=08:10

РИС.1

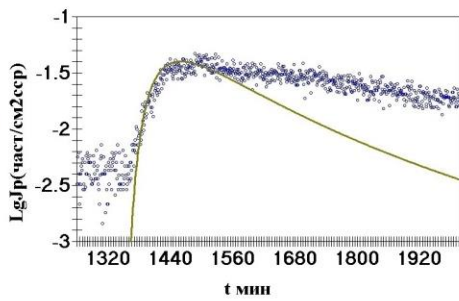
РИС.2



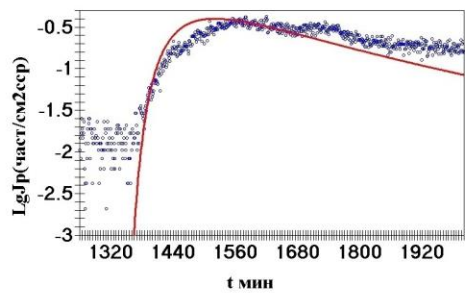
a)



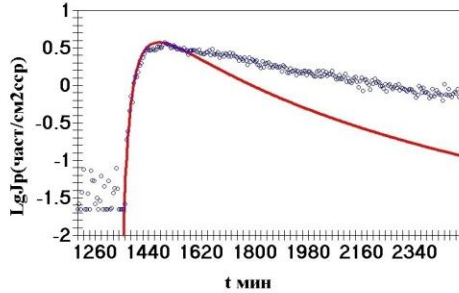
b) 165-500 MeV Tinj=22:00



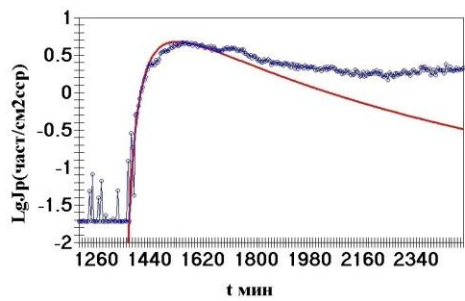
c) 80-165 MeV Tinj=22:00



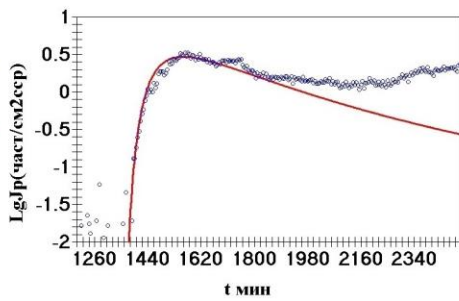
d) 40-80 MeV Tinj=22:00



e) >100 MeV Tinj=22:00

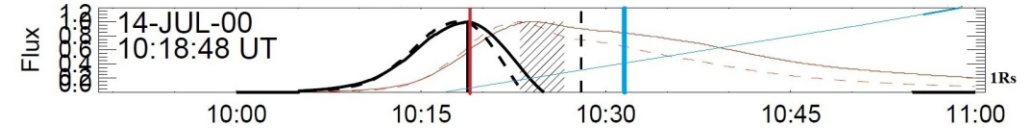


f) 60-100 MeV Tinj=22:00

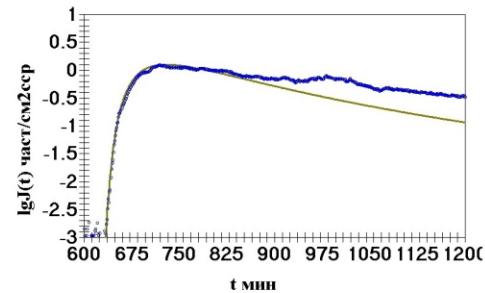


g) 50-60 MeV Tinj=22:00

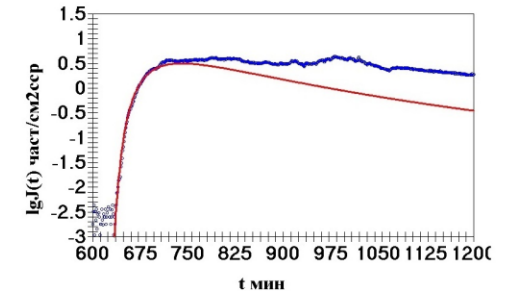
РИС.3



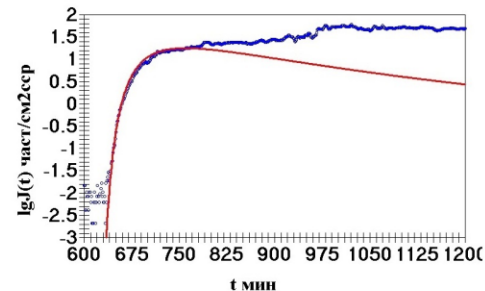
a)



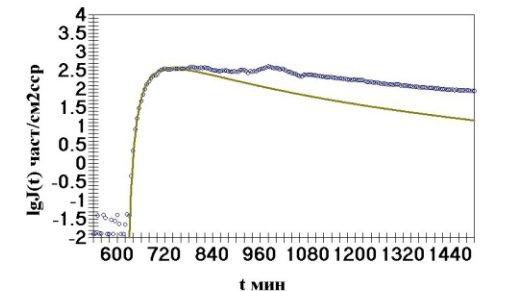
b) 165-500 MeV Tinj=10:10



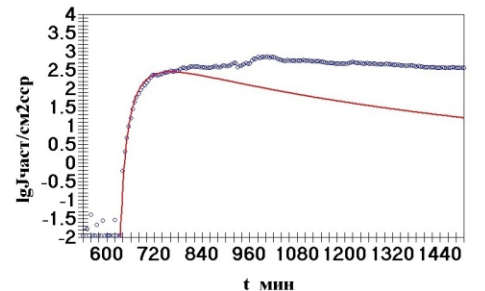
c) 80-165 MeV Tinj=10:10



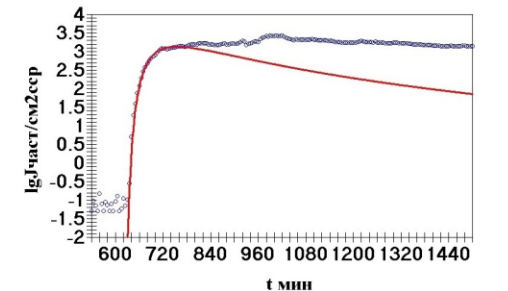
d) 40-80 MeV Tinj=10:10



e) >100 MeV Tinj=10:10

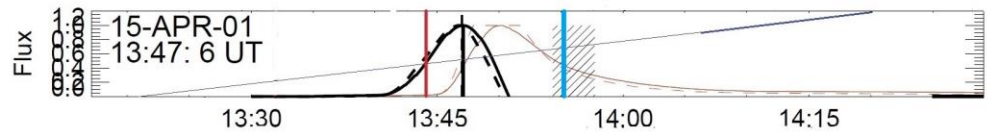


f) 60-100 MeV Tinj=10:10

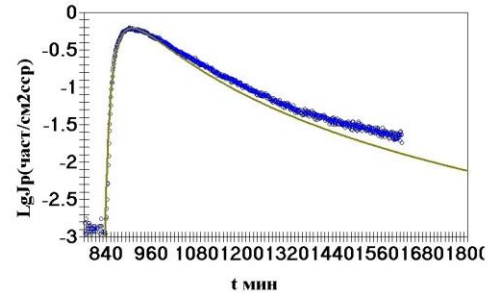


g) 50-60 MeV Tinj=10:10

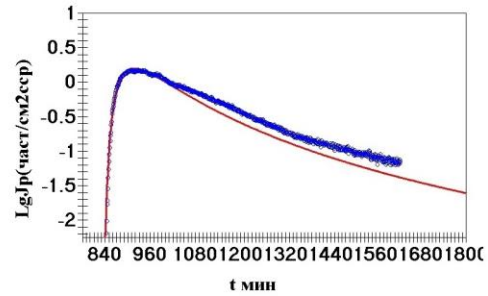
РИС.4



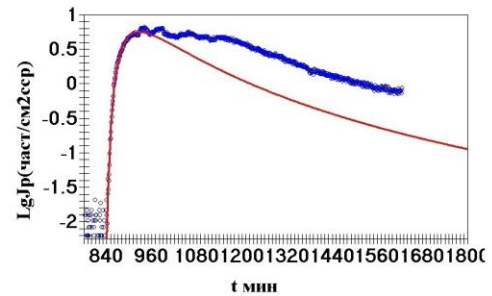
a)



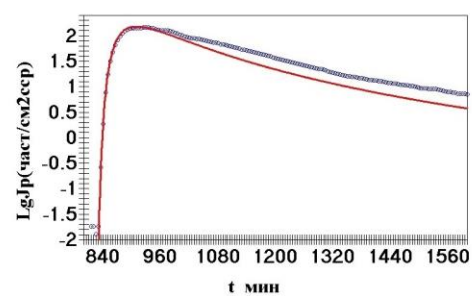
b) 165-500 MeV Tinj=13:36



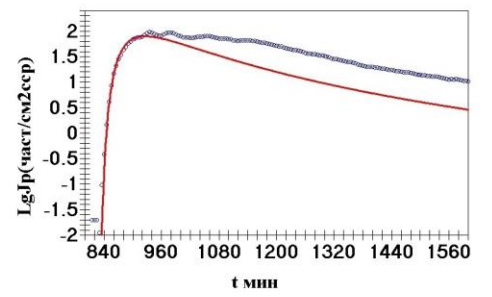
e) 80-165 MeV Tinj=13:37



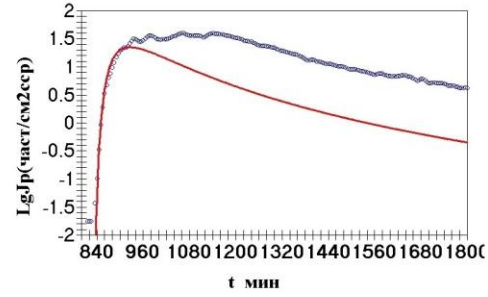
d) 40-80 MeV Tinj=13:37



e) >100 MeV Tinj=13:36

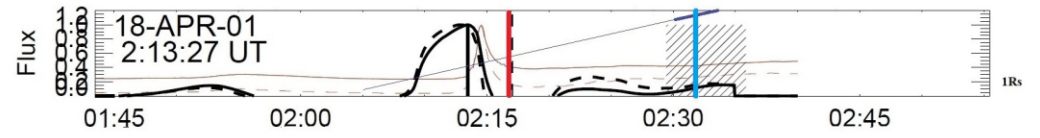


f) 60-100 MeV Tinj=13:36

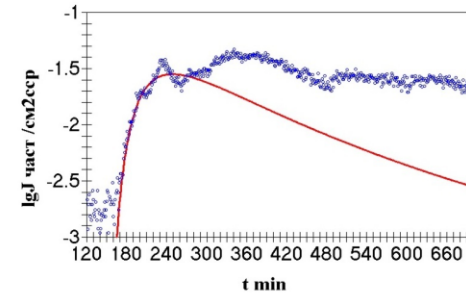


g) 50-60 MeV Tinj=13:36

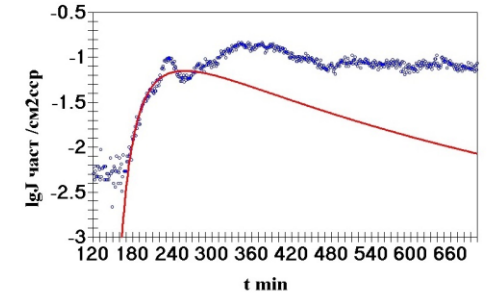
РИС.5



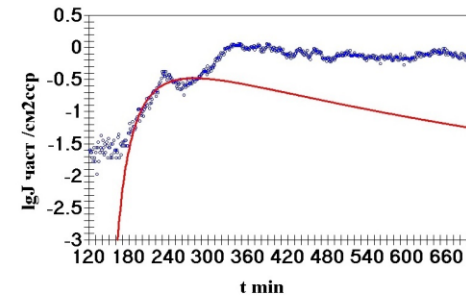
a)



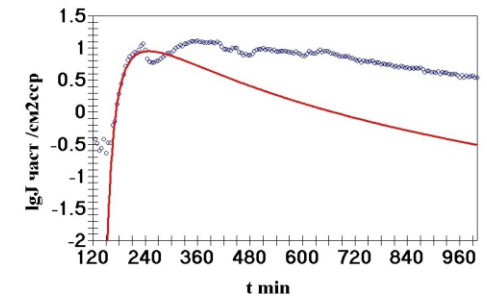
b) 165-500 MeV Tinj=02:09



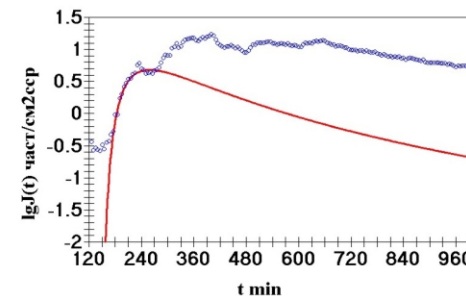
c) 80-165 MeV Tinj=02:09



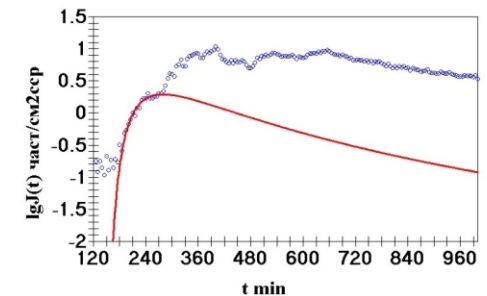
d) 40-80 MeV Tinj=02:09



e) >100 MeV Tinj=02:09

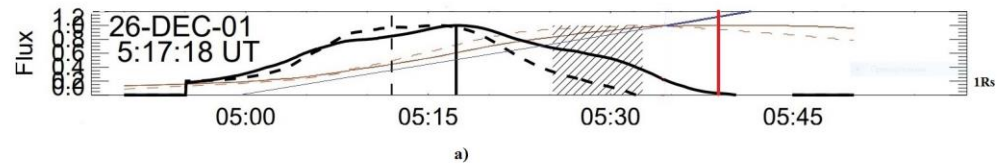


f) 60-100 MeV Tinj=02:09

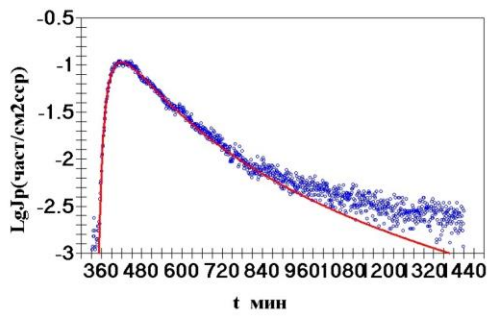


g) 50-60 MeV Tinj=02:09

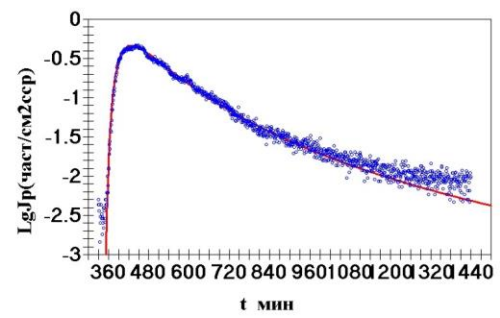
РИС.6



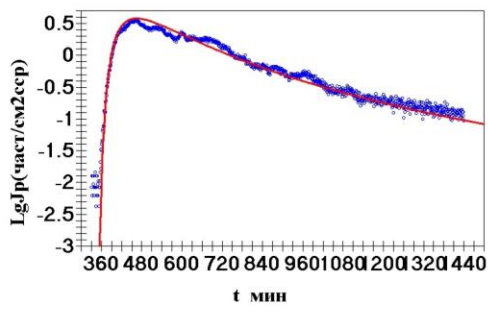
a)



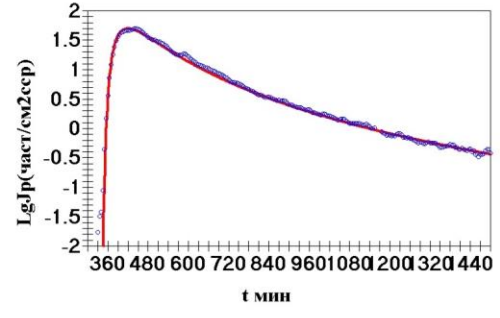
b) 165-500 MeV Tinj=05:30



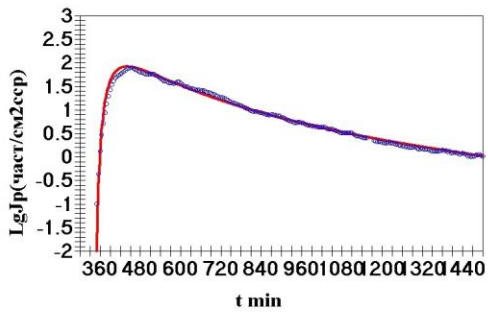
c) 80-165 MeV Tinj=05:31



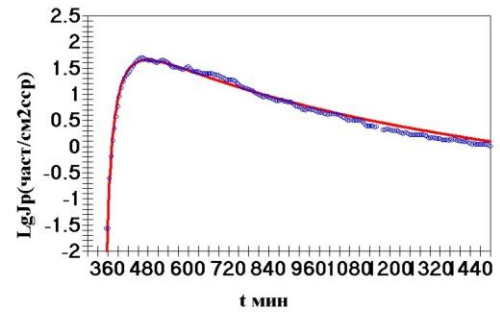
d) 40-80 MeV Tinj=05:30



e) >100 MeV Tinj=05:30

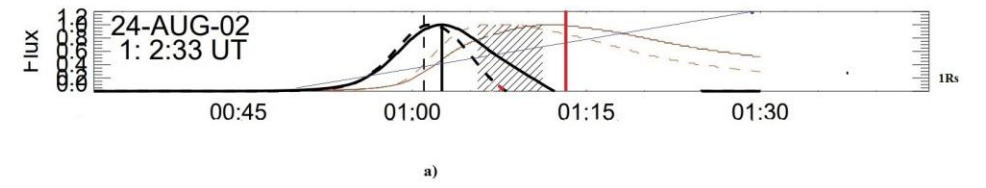


f) 60-100 MeV Tinj=05:30

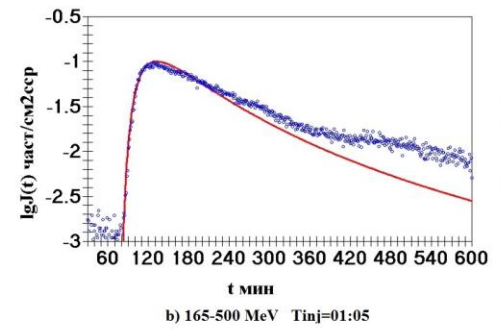


g) 50-60 MeV Tinj=05:30

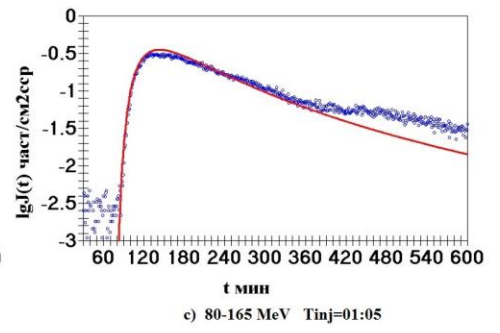
РИС.7



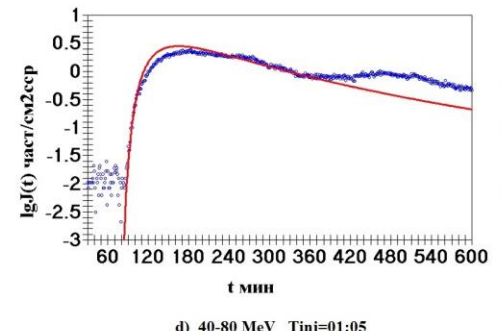
a)



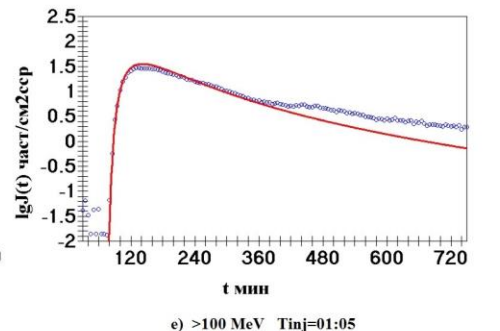
b) 165-500 MeV Tinj=01:05



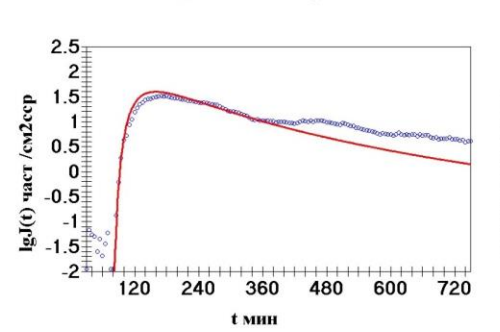
c) 80-165 MeV Tinj=01:05



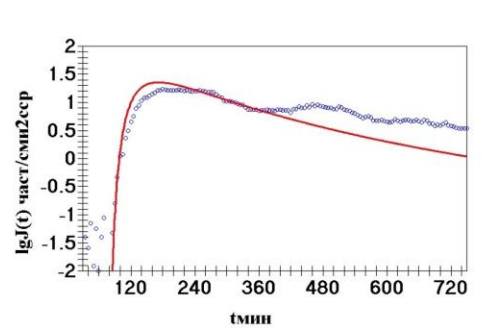
d) 40-80 MeV Tinj=01:05



e) >100 MeV Tinj=01:05

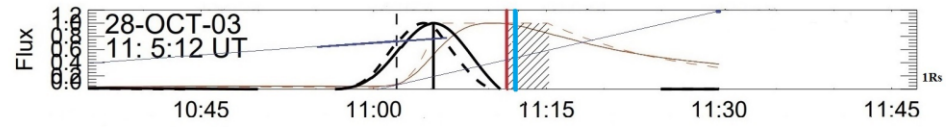


f) 60-100 MeV Tinj=01:05

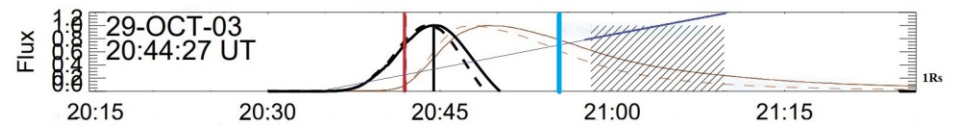


g) 50-60 MeV Tinj=01:05

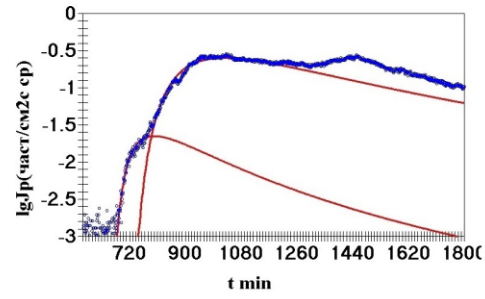
РИС.8



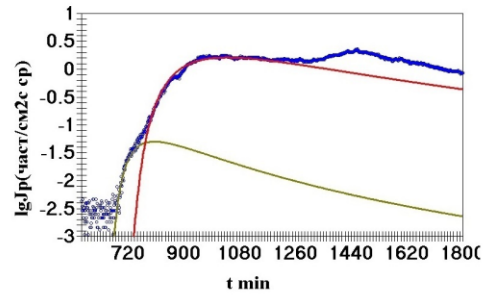
a)



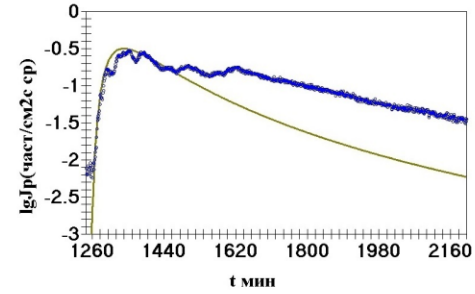
a)



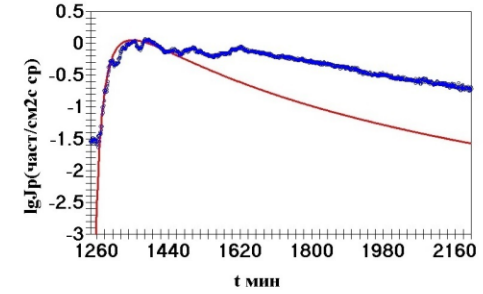
b) 165-500 MeV Tinj=11:05
Tinj2= 10:25 (CME PH start 10:23 V=1054) 1Rs



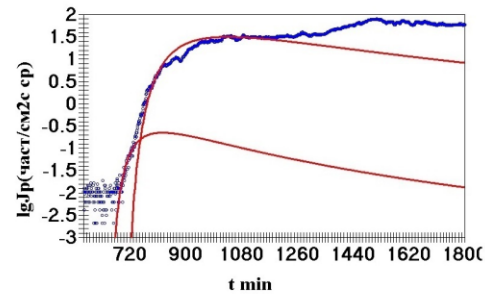
c) 80-165 MeV Tinj=11:05
Tinj2= 10:25 (CME PH start 10:23 V=1054) 1Rs



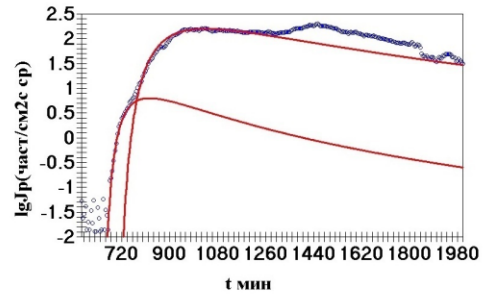
b) 165-500 MeV Tinj=20:35



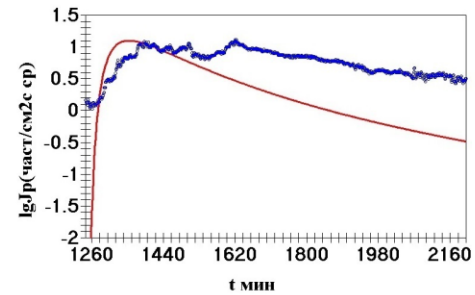
c) 80-165 MeV Tinj=20:35



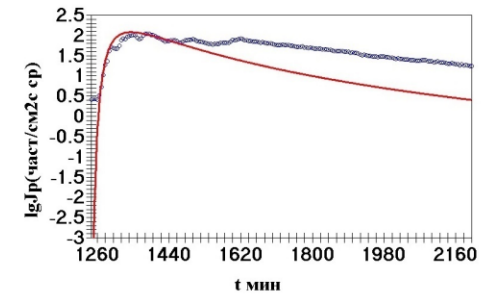
d) 40-80 MeV Tinj=11:05
Tinj2=10:25 (CME PH start 10:23 V=1054) 1Rs



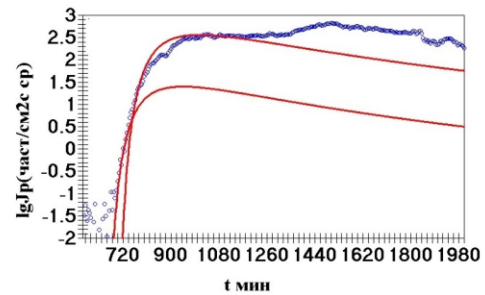
e) >100 MeV Tinj=11:05
Tinj2=10:25 (CME PH start 10:23 V=1054) 1Rs



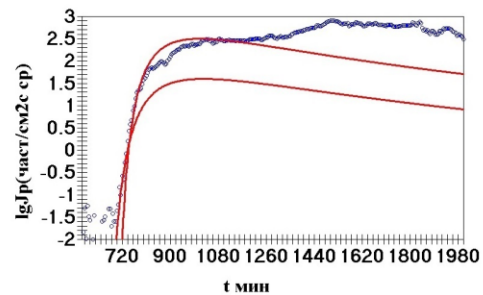
d) 40-80 MeV Tinj=20:35



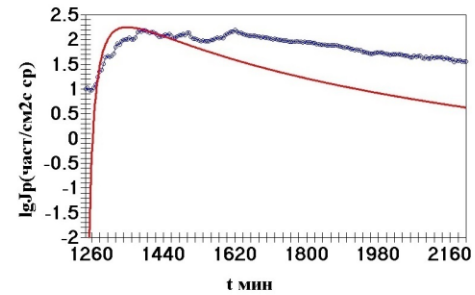
e) >100 MeV Tinj=20:35



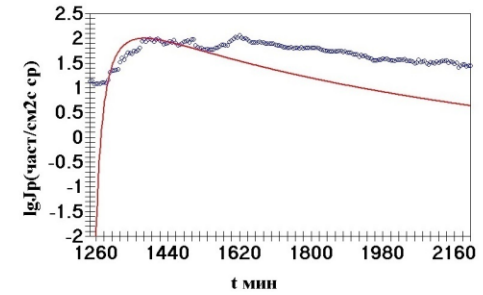
д) 60-100 MeV Tinj=11:05
Tinj2=10:25 (CME PH start 10:23 V=1054) 1Rs



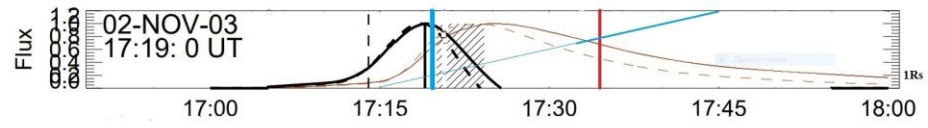
г) 50-60 MeV Tinj=11:05
Tinj2=10:25 (CME PH start 10:23 V=1054) 1Rs



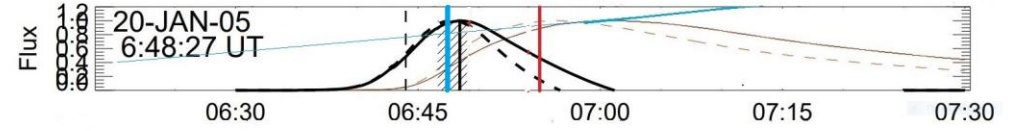
д) 60-100 MeV Tinj=20:35



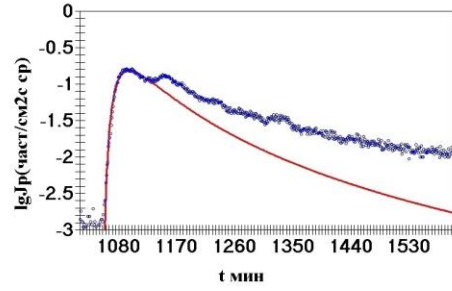
г) 50-60 MeV Tinj=20:35



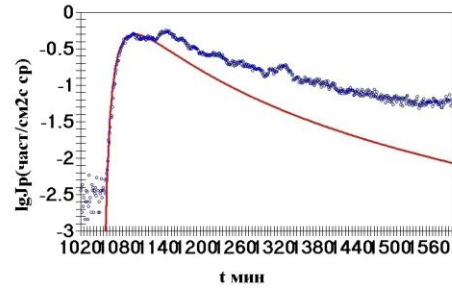
a)



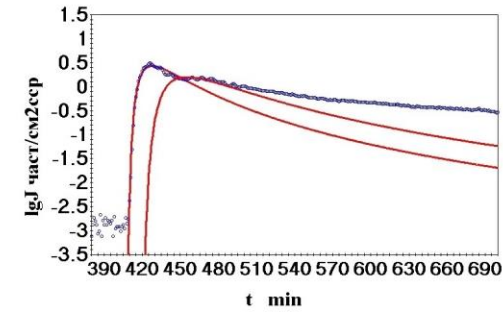
a)



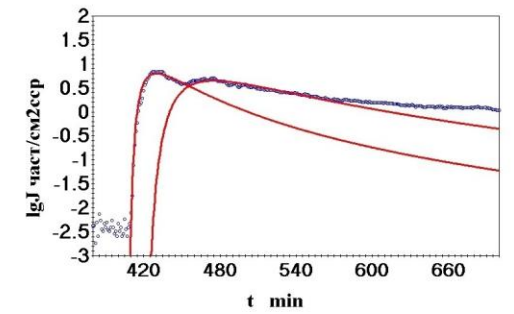
b) 165-500 MeV Tinj=17:26



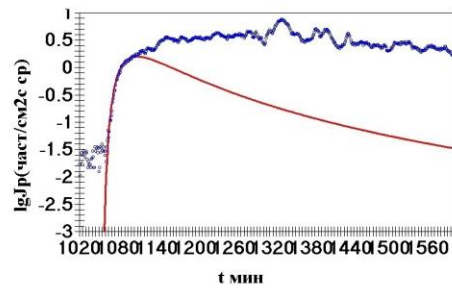
c) 80-165 MeV Tinj=17:26



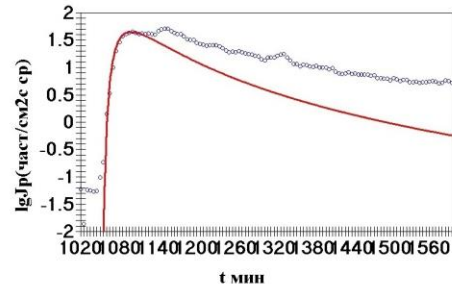
b) 165-500 MeV Tinj=06:46



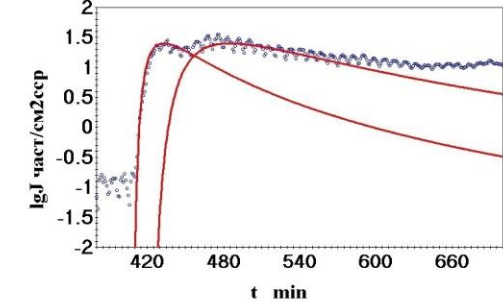
c) 80-165 MeV Tinj=06:46



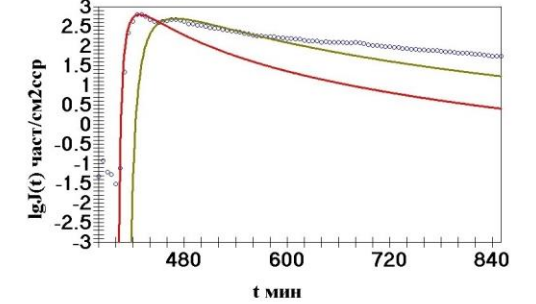
d) 40-80 MeV Tinj=17:26



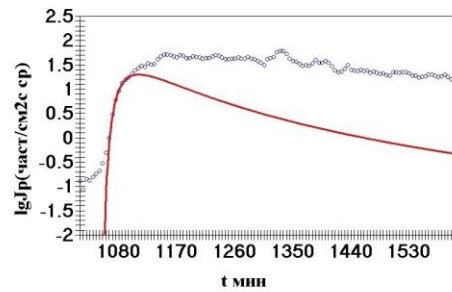
e) >100 MeV Tinj=17:26



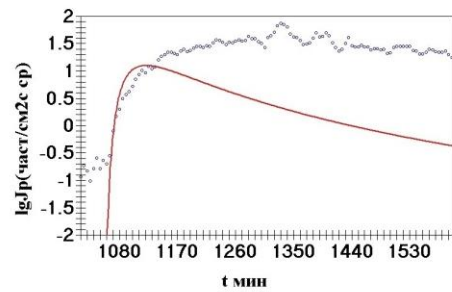
d) 40-80 MeV Tinj=06:46



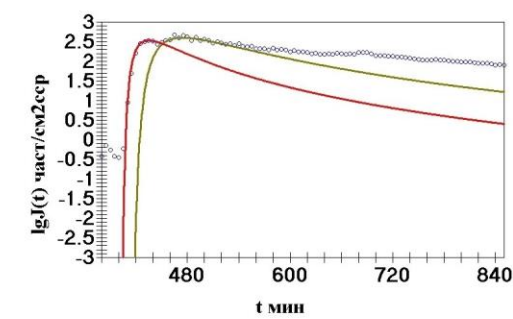
e) >100 MeV Tinj=06:45



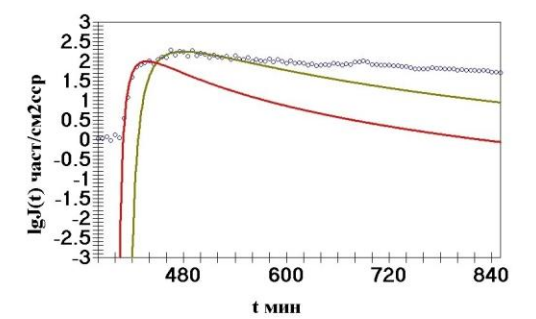
f) 60-100 MeV Tinj=17:26



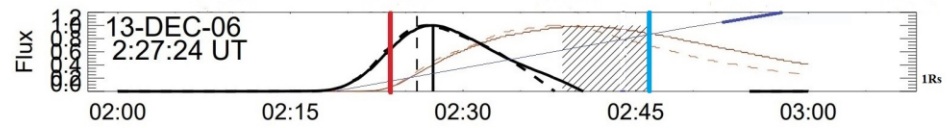
g) 50-60 MeV Tinj=17:26



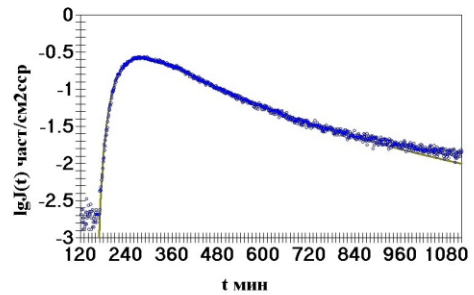
f) 60-100 MeV Tinj=06:45



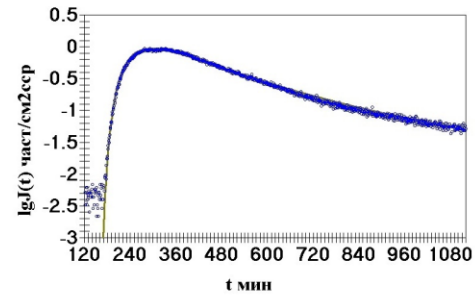
g) 50-60 MeV Tinj=06:45



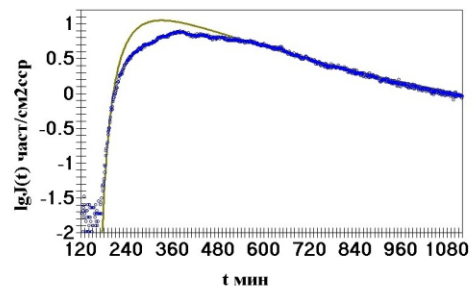
a)



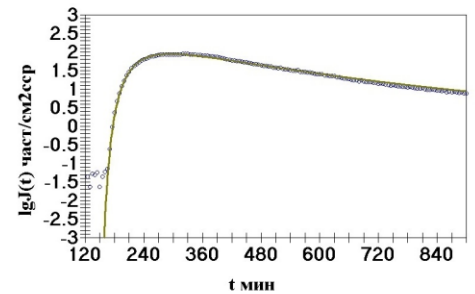
b) 165-500 MeV Tinj=02:16



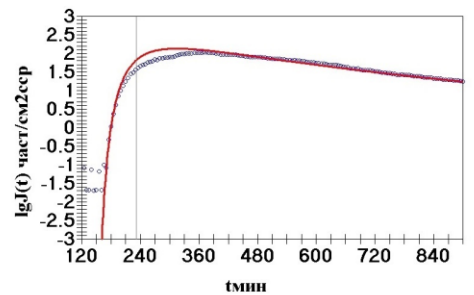
c) 80-165 MeV Tinj=02:16



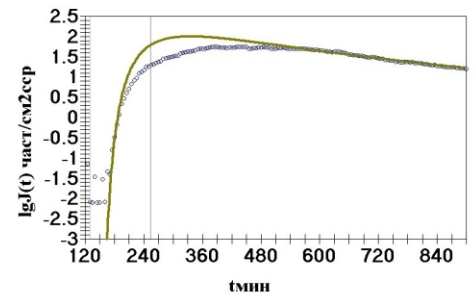
d) 40-80 MeV Tinj=02:16



e) >100 MeV Tinj=02:15



f) 60-100 MeV Tinj=02:15



g) 50-60 MeV Tinj=02:15

№	Дата		Ti,scailin g	Ti,Reams	Ti, Bazilevskaja	T _{II}
1	02.05.1998	S15W15	822	826.7	-	809.7
2	06.05.1998	S15W64	493	483.5	-	477.7
3	24.08.1998	N35E09	1320	1352	-	1313.7
4	14.07.2000	N22W07	610	616.5	622.7	608.9
5	15.04.2001	S20W084	816	827.7	827	818.7
6	18.04.2001	W115	129	144.3	143	128.7
7	26.12.2001	N08W54	330	320.6	-	303.7
8	24.08.2002	S02W81	65	60.1	-	54.7
9	28.10.2003	S16E08	665	665.1	664	652
10	29.10.2003	S15W02	1235	1255.6	1247	1231.7
11	02.11.2003	S14W56	1046	1033.8	1031	1025.7
12	20.01.2005	N12W58	406	399.5	399.1	395.7
13	13.12.2006	S06W26	136	154	157.8	138.7

Результаты исследования

Для индивидуальных событий времена начала инжекции в данной работе и в работах [5-6] как правило, отличаются (также как в работах [5] и [6] друг от друга).

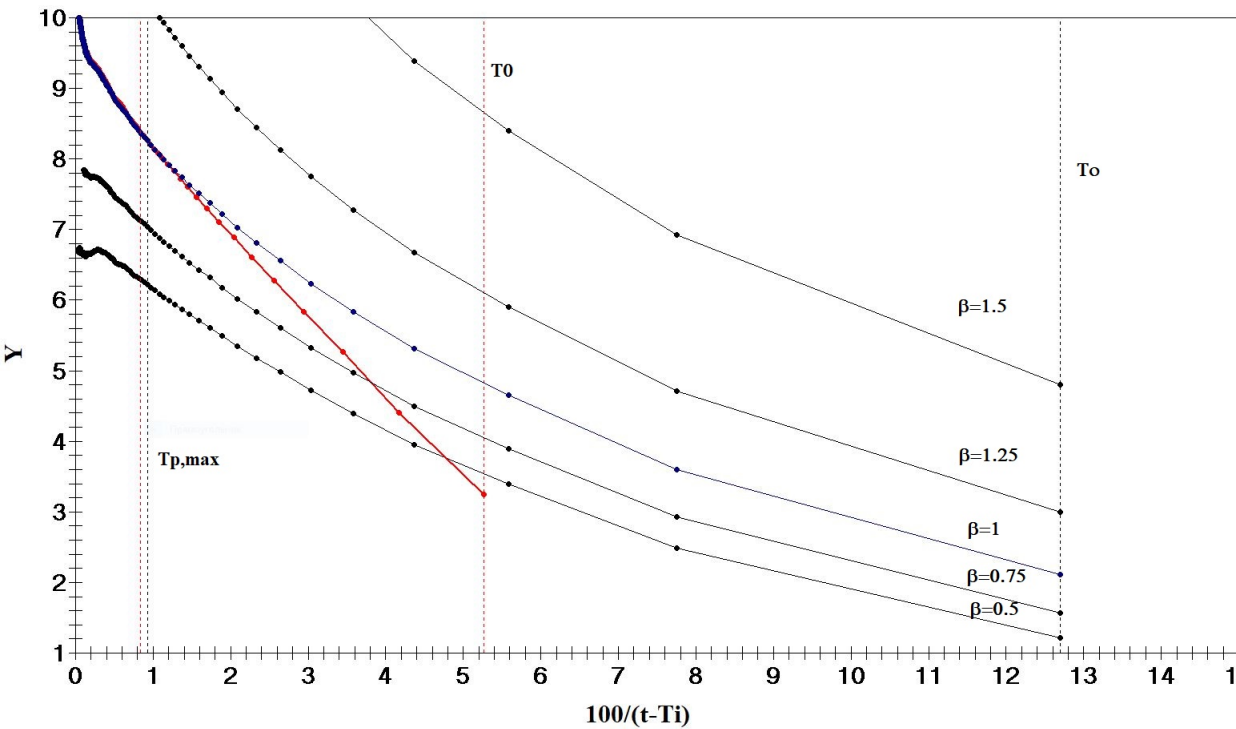
Отличие результатов данной работы от двух других в более раннем времени инжекции.

В работе [5] среднее значение ($t_{inj0}-t_{II}$) (где t_{II} -время наблюдения всплесков II типа) равно 13.8 ± 2.6 мин, в работе [6] оно равно 12.4 ± 1.5 мин. Для инжекции по скейлингу: 8.4 ± 2.4 мин, то есть меньше. Среднее время для разницы между началом инжекции, определенное в данной работе, и временем в работе [5] равно -5.4 ± 3.7 мин, между данной работой и результатами [6]: -7.2 ± 4.0 мин. Таким образом, начало инжекции, определенное по временному ходу с учетом скейлинга в большинстве случаев происходит раньше чем найденное в предыдущих работах

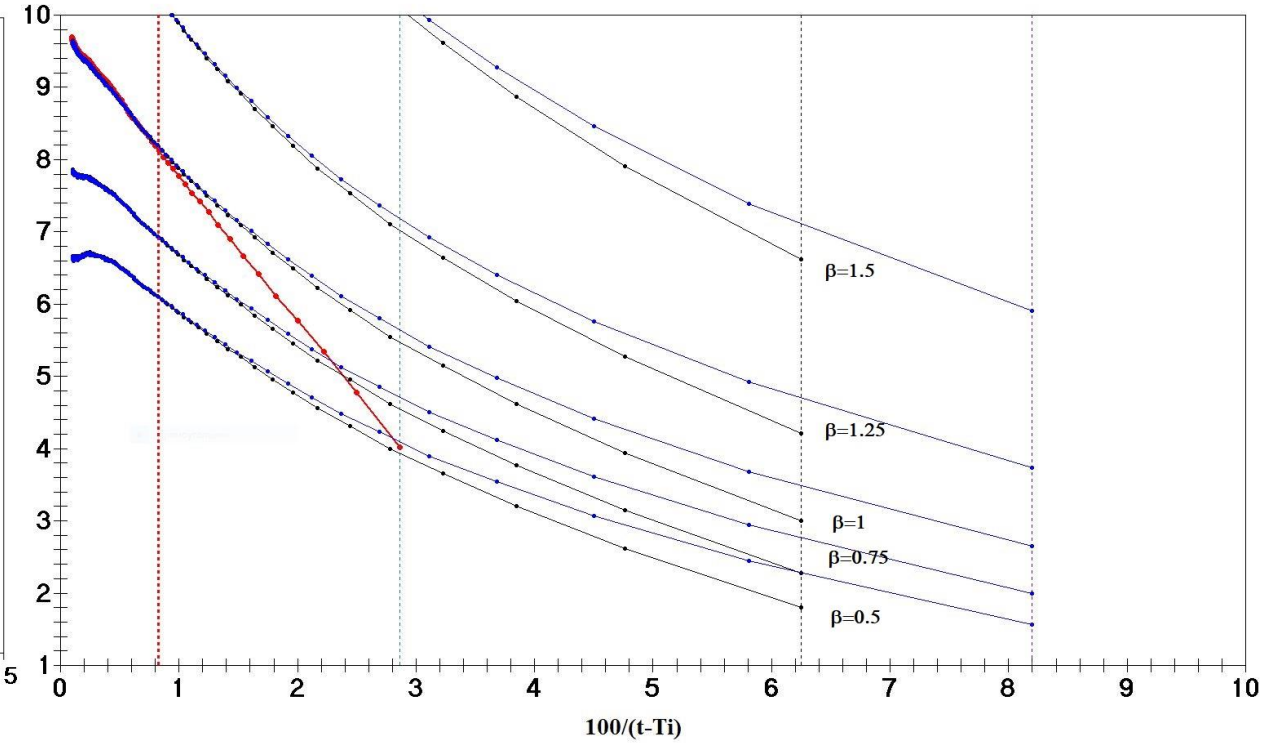
5. D.V.Reames . Solar release times of energetic particles in ground-level events. The Astrophysical Journal, 2009, v693,pp.812-821. DOI:10.1088/0004-637X/693/1/812

6. G.A.Bazilevskaya. On the early phase of relativistic solar particle events: Are there signatures of acceleration mechanism? Advances in Space Research, 2009, 43, pp.530-536.

Критерий правильности определения времени инъекции- хорошая аппроксимация временного хода



2001.04.15 >100 MeV . Красная –скейлинг $T_i=13:36$;
Черная [5] $T_i=13:46,7$ (точки –данные, кривые-
линии,соединяющие точки)



2006.12.13 >100 MeV . Красная –скейлинг $T_i=02:16$;
черная [5] $T_i=02:34$; синяя [6] $T_i=02:37,8$ (точки –данные,
кривые –линии, соединяющие точки)

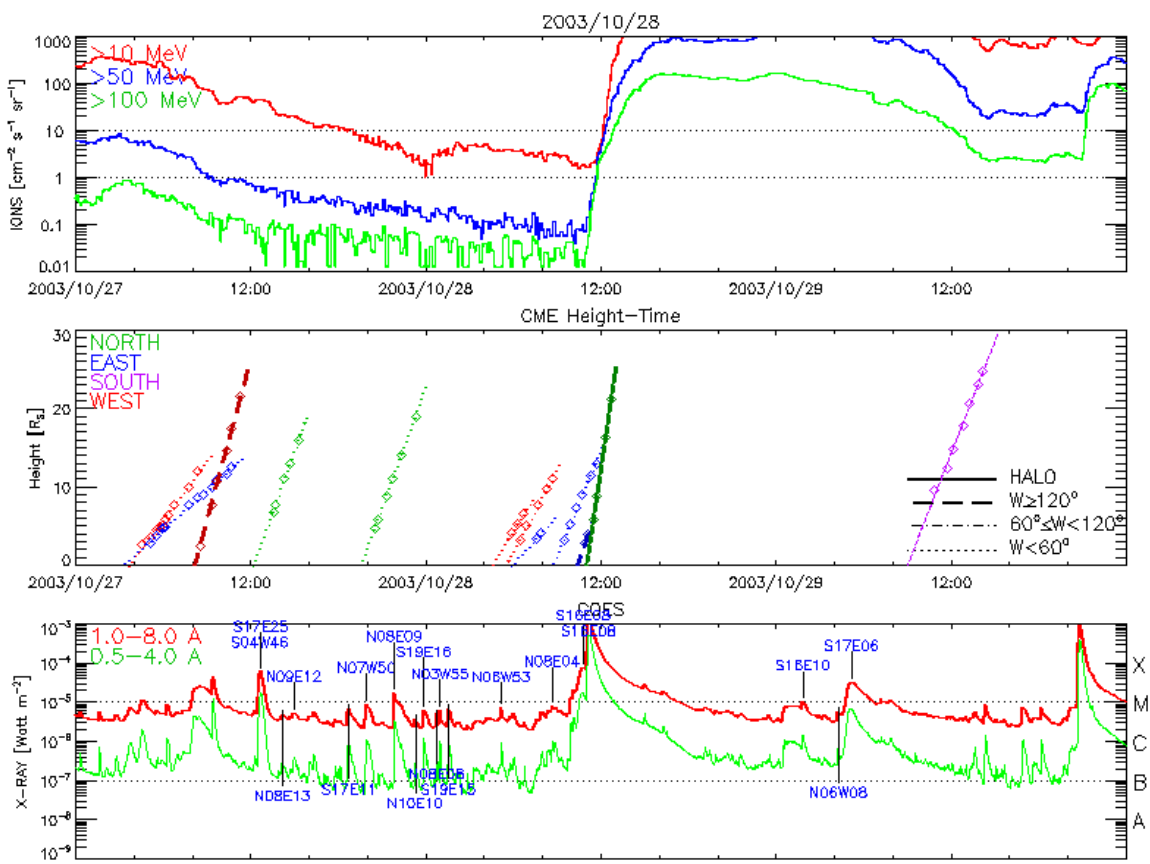
$$Y=Lg(J(t)*(t-T_i)^3/(2-\beta))=A-B/(t-T_i)$$

5. D.V.Reames . Solar release times of energetic particles in ground-level events. The Astrophysical Journal, 2009, v693,pp.812-821. DOI:10.1088/0004-637X/693/1/812

6. G.A.Bazilevskaya. On the early phase of relativistic solar particle events: Are there signatures of acceleration mechanism? Advances in Space Research, 2009, 43, pp.530-536.

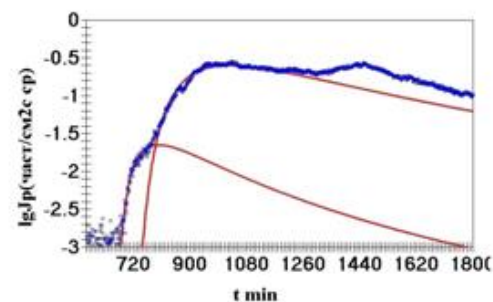
Отличие привязки по скейлингу от других методов

1. Этот метод применим к большому числу событий, в которых не было релятивистских протонов (по данным событий 23 цикла). [3-4]
2. В [1 -4] было показано, что начало инжекции не зависит от энергии протонов (с точностью до 5 минут, здесь показана – с точностью 1 мин.). В других методах это принимается как гипотеза.
3. Время инжекции определяется не по одной точке- начала события, а по всему временному ходу (до максимума, а иногда и значительно большему)
4. Определяется время начала инжекции для всего массива частиц, а не частиц которые были инжектированы первыми (эти времена в принципе могут быть разными).

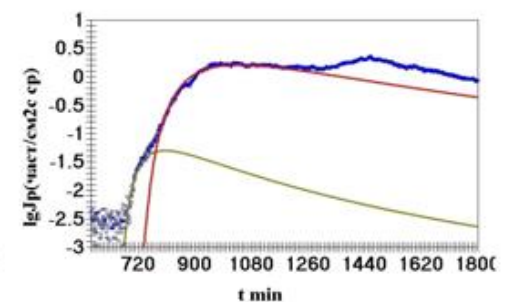


5. Возможно наложение событий и малое событие перед началом большого события может маскировать приход первых протонов от большого события. В этих событиях первый приход будет от малого события и метод даст ошибочные результаты для СПС.

Такая ситуация реализуется для протонов 10-ки Мэв в событии 28.10.2003 и, по-видимому, в событии 20.01.2005 .



b) 165-500 MeV Tinj=11:05
Tin2= 10:25 (CME PH start 10:23 V=1054) 1Rs

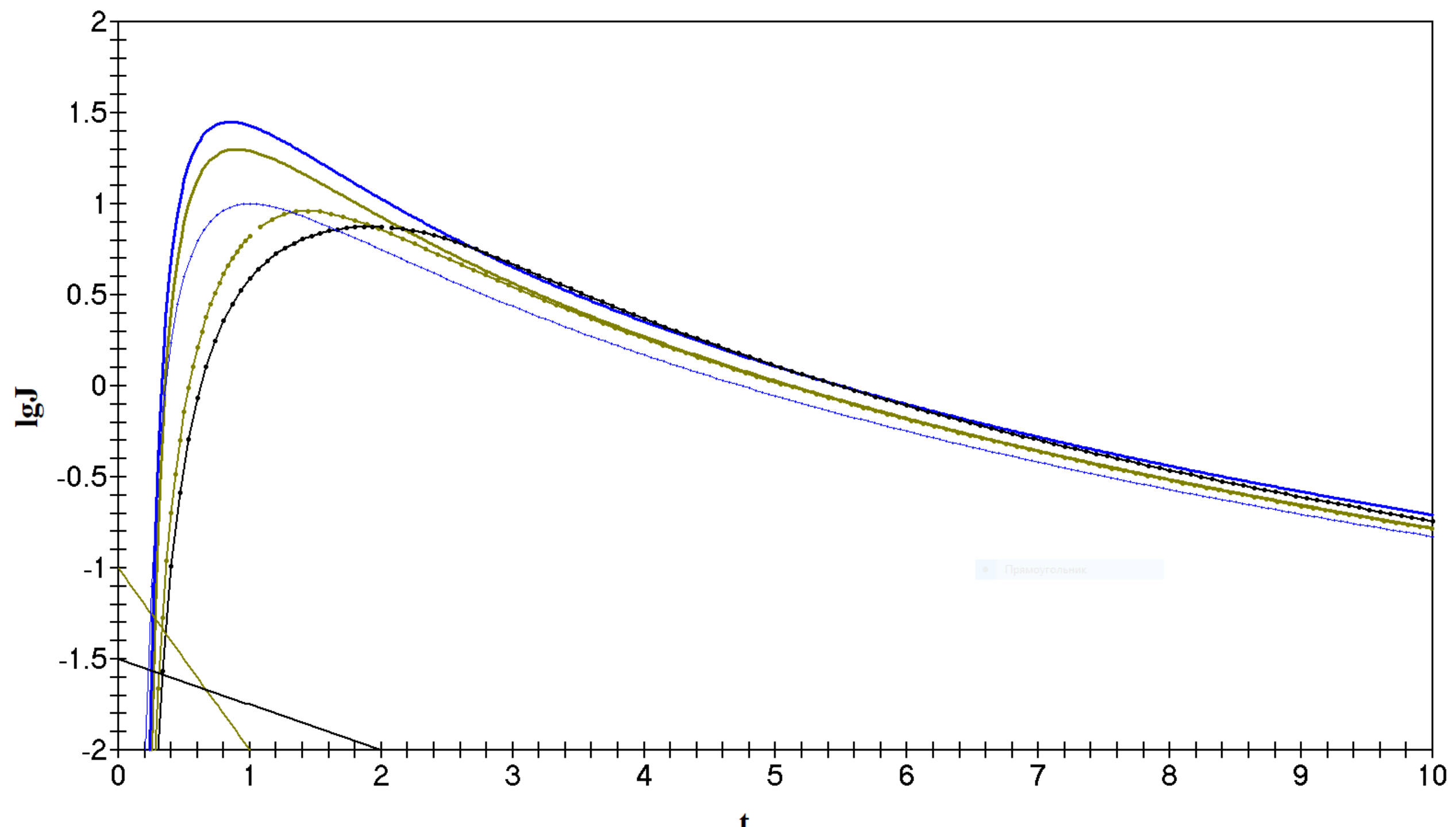


c) 80-165 MeV Tinj=11:05
Tin2= 10:25 (CME PH start 10:23 V=1054) 1Rs

Основные выводы

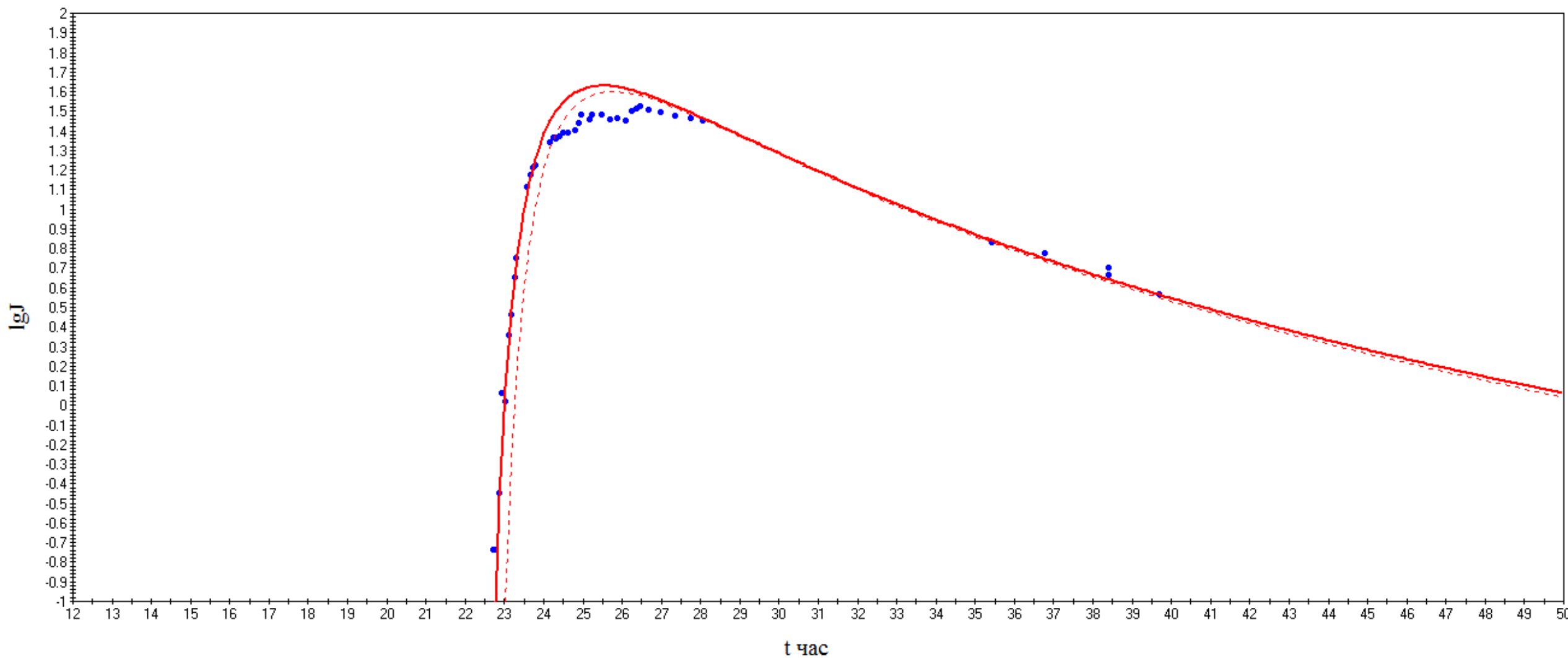
1. Исследование показало, что для всех рассмотренных событий справедлив **скейлинг (масштабная инвариантность)**, по крайней мере на фазе роста событий.
2. Время инъекции протонов с энергией 10-ки МэВ и сотни МэВ совпадают с **точностью до минуты**.
3. В ряде событий наблюдается **длительная инъекция**.
4. Существуют события с **многократной** (как и обнаруженная ранее двукратная инъекция релятивистских протонов): одна компонента быстрая, другая медленная (время достижения максимума в ней значительно больше, чем в первой).
5. Общей закономерностью является **превышение времени инъекции** времени протонов **над временем наблюдения всплесков II типа**.
6. Отличие результатов данной работы от двух других в **более раннем времени инъекции**.
7. Критерием правильности привязки может служить **хорошая аппроксимация временного хода** потока протонов в СПС (что в ряде случаев является преимуществом для привязки по скейлингу)

Спасибо за внимание

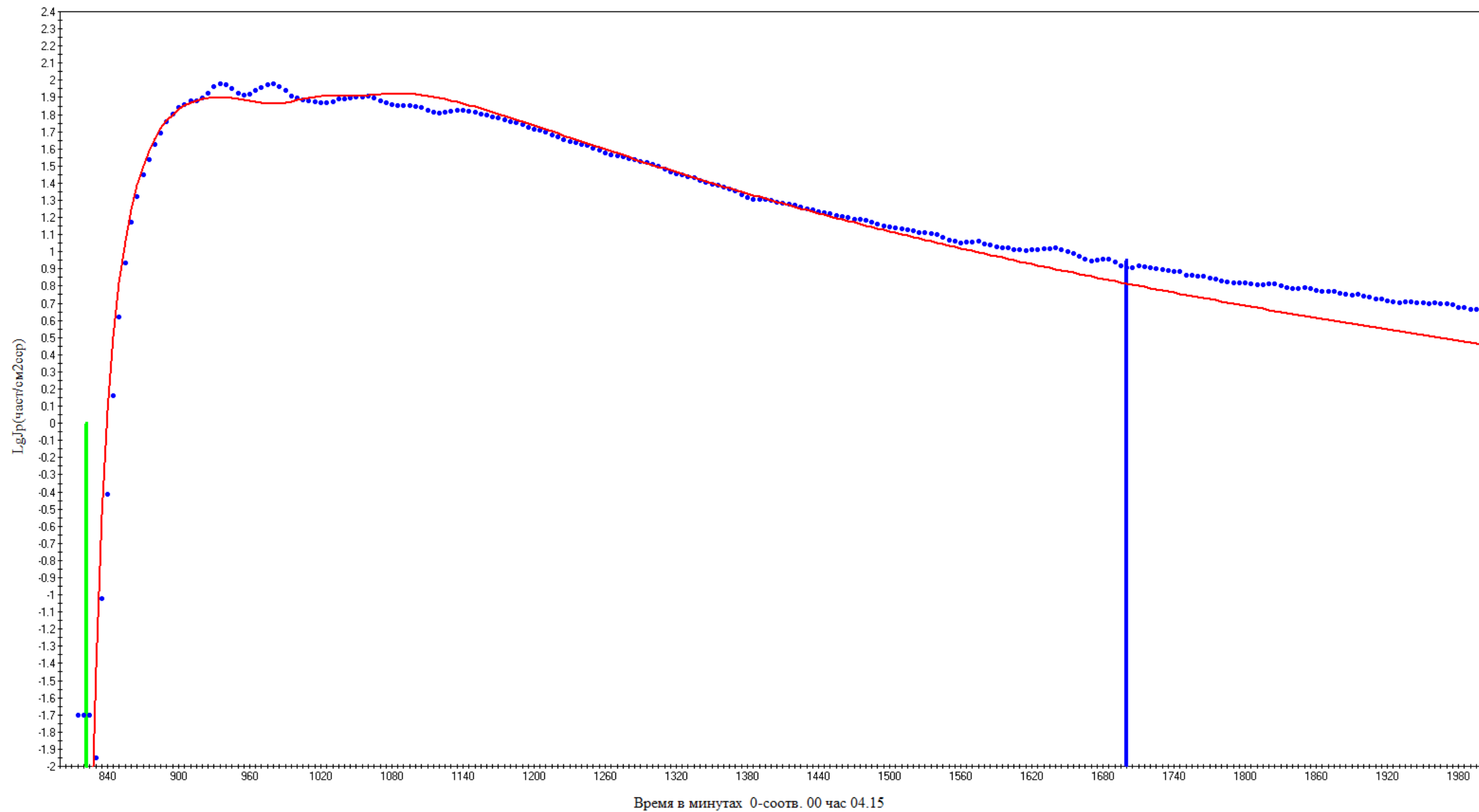


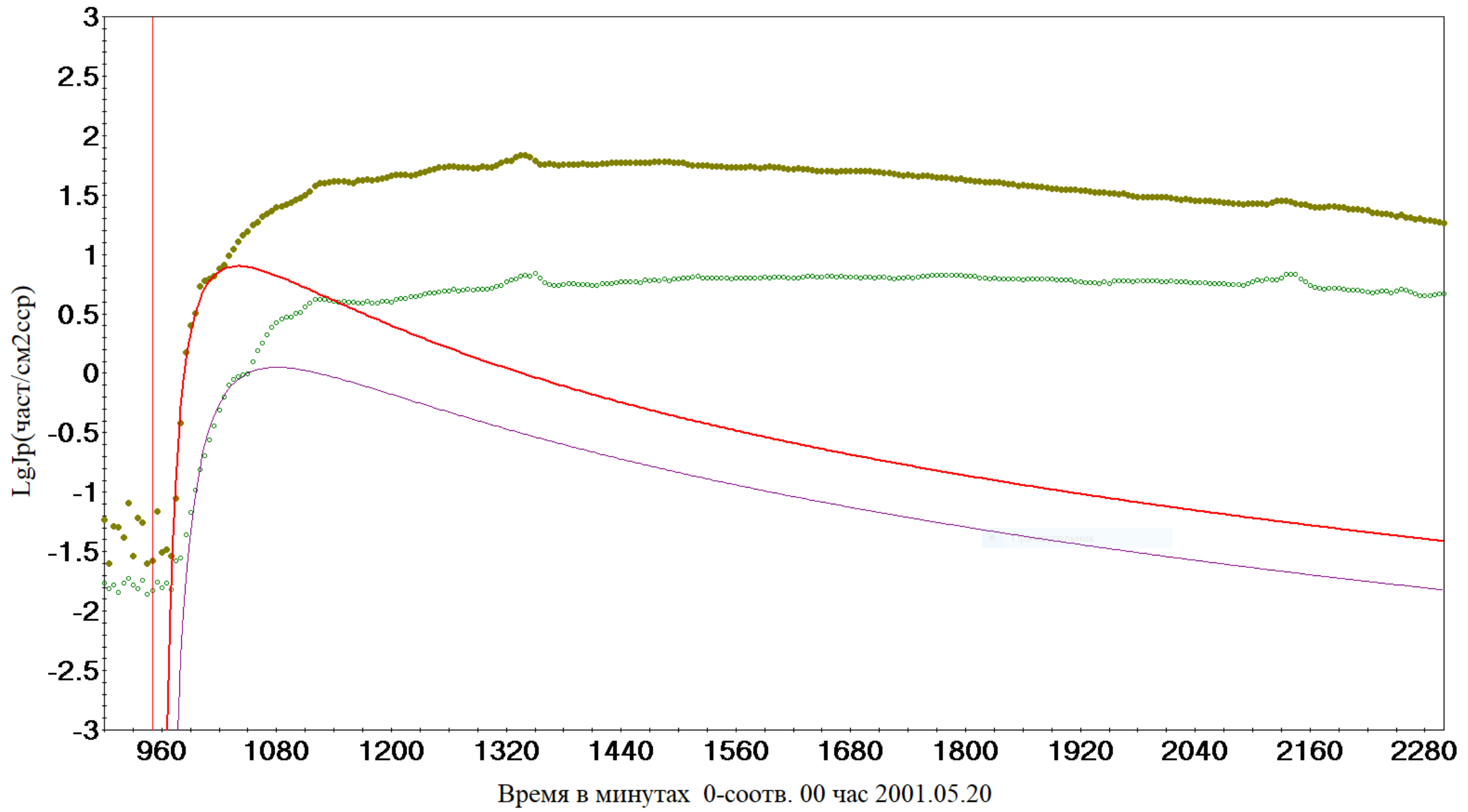
СПС 1961.09.28 > 23 МэВ N13E29 T_{opt,max}=22:23 (22.38) Krimigis

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



2001.04.15 X14 Ep (60-100) MeV $T_{inj}(sx)=13.7$ желтая - момент вспышки. синяя-начало возмущения (5,10 МэВ)





20.01.2005

