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

Основан в 1956 г.

Определение вида функции инжекции протонов в солнечных протонных событиях с масштабным подобием временного профиля.

Очелков Ю.П.

39 Всероссийская конференция по космическим лучам

Введение .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: $J(t) = J_m \left(\frac{\Delta T_m}{\Delta t}\right)^3 e^{(3-3\frac{\Delta T_m}{\Delta t})}$; $\Delta t = t - Tinj$; $\Delta T_m = t_m - T_{inj}$ и время инжекции не зависит от энергии протонов.

1.*Очелков Ю.П. Гелиогеофизические исследования, выпуск 19, 47 – 74, 2018*

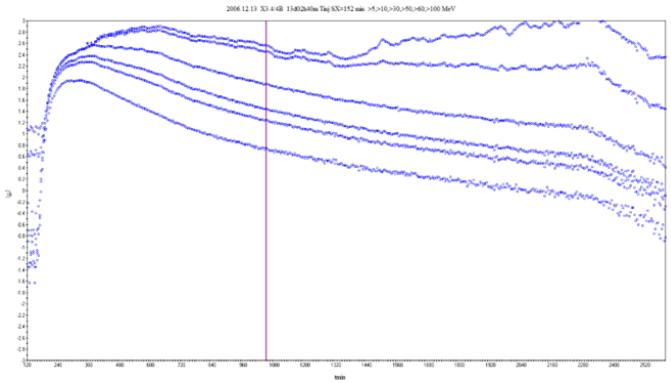
2.Очелков Ю.П. // Известия РАН, серия физическая, 2021, том 85, № 8, с. 1189-1193

3. *Yu.P.Ochelkov..Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2023, Vol.87,No 7, pp. 1066-1070*

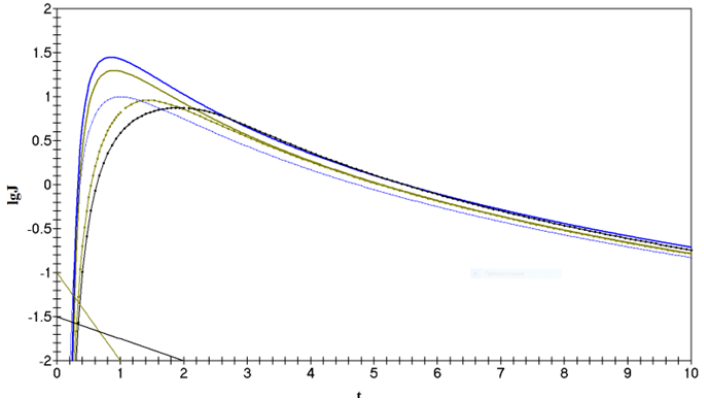
4. *Ю. П. Очелков. Гелиогеофизические исследования. выпуск 37, 16 – 41, 2023*

Возмущения масштабноподобного временного профиля

Невозмущенный временной ход встречается редко, для многих событий имеют место возмущения. На стадии максимума это в основном влияние длительной инжекции, на стадии спада – влияние ударных волн от коронального выброса масс (КВМ) для события, в котором былиинжектированы протоны, либо от предшествующих корональных выбросов .



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



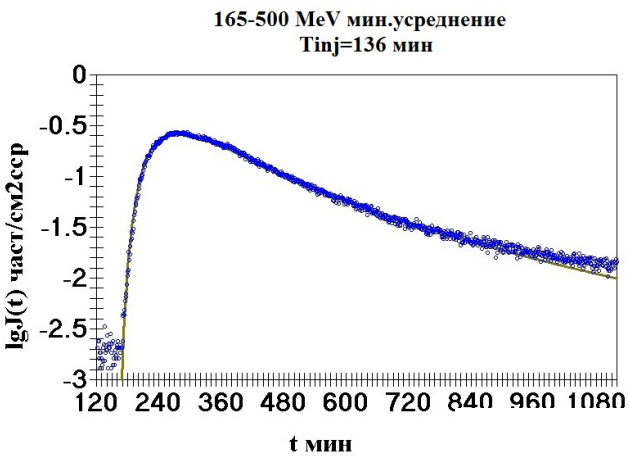
Пример длительной инжекции. Точки –рассчитанные значения. Сплошные линии-аппроксимация при линейной зависимости /1/.

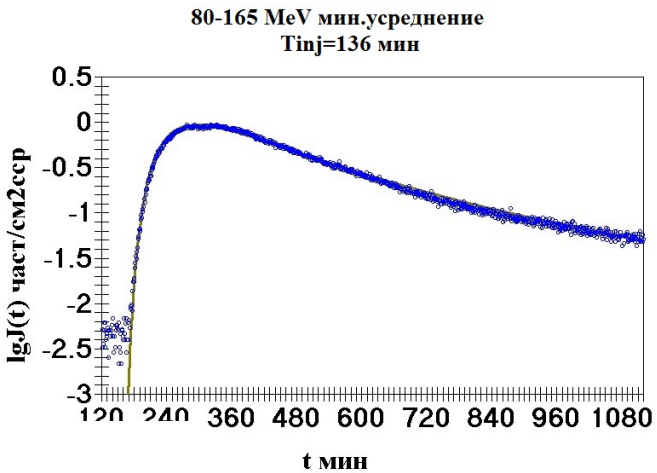
В данной работе рассматривается инжекция солнечных протонов и ее функциональная зависимость , которая позволяет описывать временной ход событий с длительной инжекцией. Как правило для более высоких энергий в таких событиях наблюдается мгновенная инжекция и временной ход, соответствующий масштабному подобию.

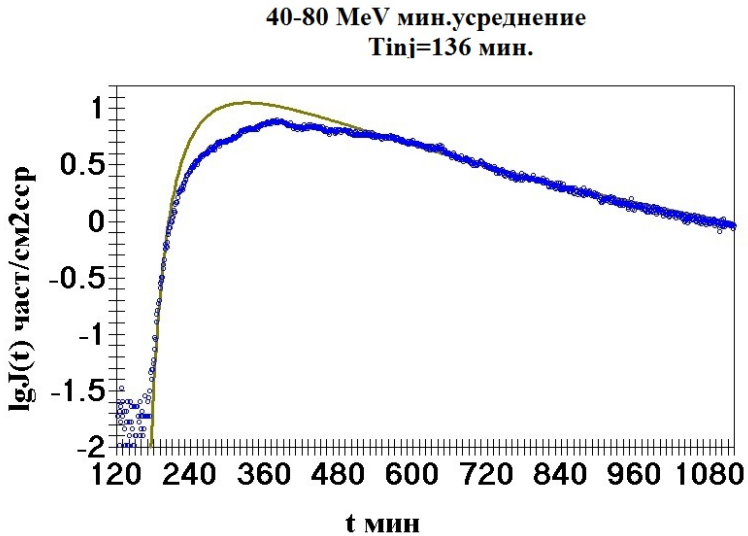
Точки- данные GOES .Красные кривые-логарифм функции скейлинга:

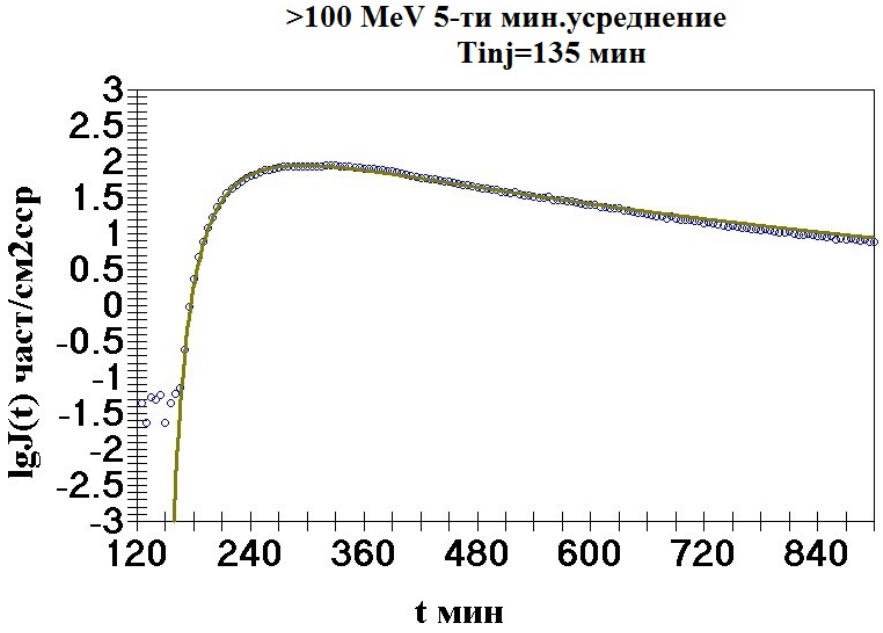
$$Lgf(E,t)=Jm+3*(lg(\Delta Tm/(t-Tinj))+(1-\Delta Tm/(t-Tinj))/ln10)); \quad \Delta Tm=Tm-Tinj$$

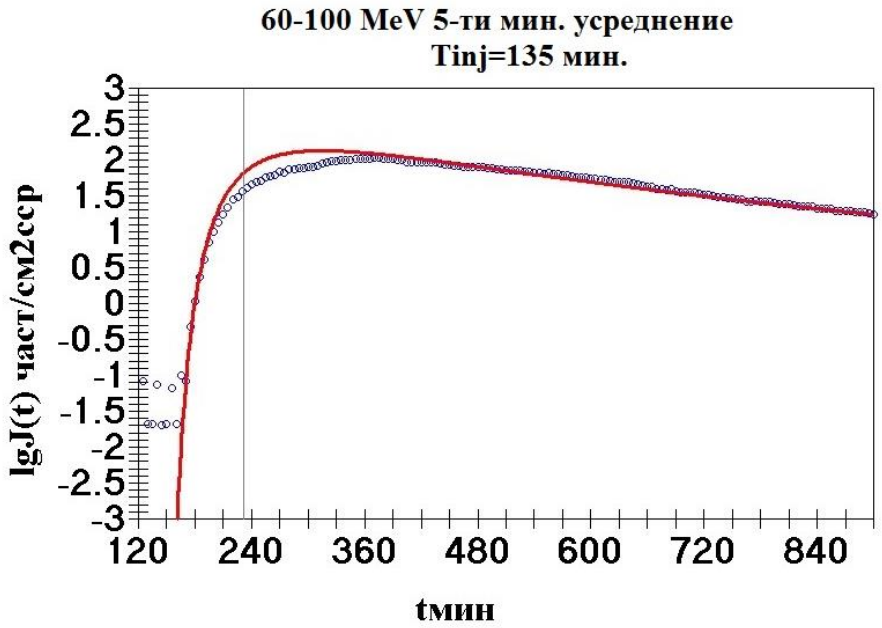
2006.12.06

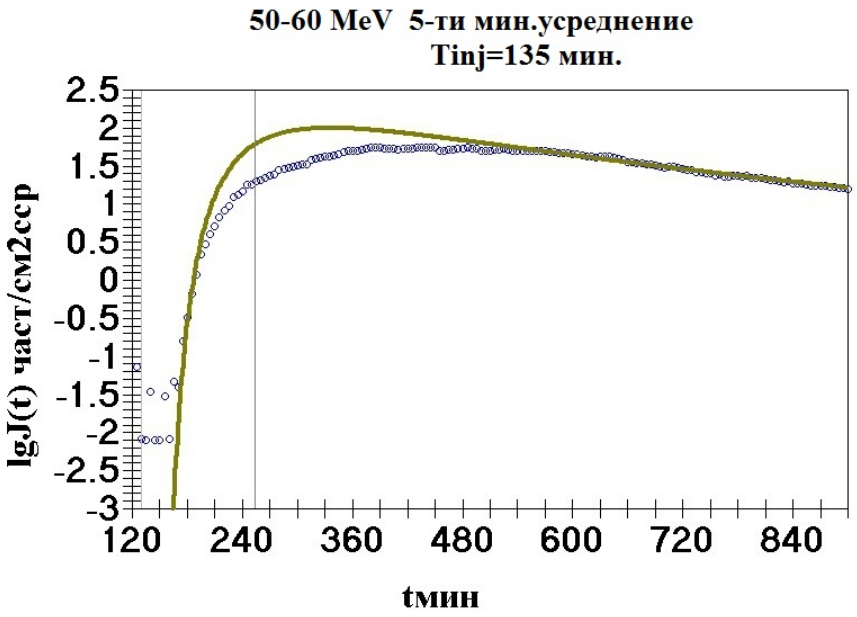







>100 MeV 5-ти мин.усреднение
Tinj=135 мин
lgJ(t) част/см2ср
t мин


60-100 MeV 5-ти мин. усреднение
Tinj=135 мин.
lgJ(t) част/см2ср
tмин


50-60 MeV 5-ти мин.усреднение
Tinj=135 мин.
lgJ(t) част/см2ср
tмин

Интерпретация временных ходов 40-80 МэВ, 50-60 МэВ и 60-100 МэВ

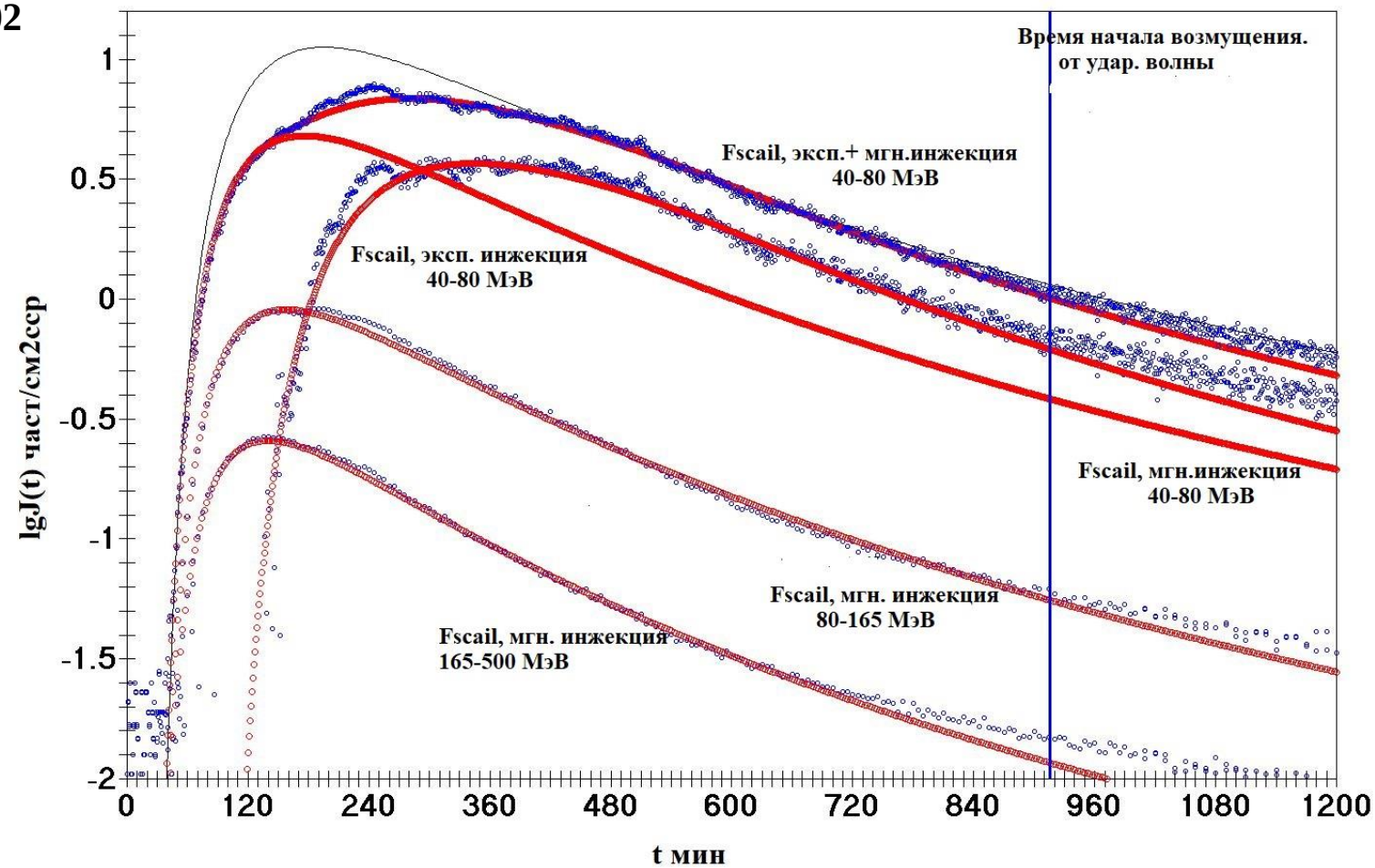
Tinj0=0

$$F_{scail} = J_{m,1}\left(\frac{T_m}{t}\right)^3 e^{3-3\frac{T_m}{t}}; \qquad G_{inj}(t_{inj}) = J_{m,2}\frac{1}{100}e^{-\frac{t_{inj}-T_0}{100}}\theta(t_{inj}-T_0); \quad \int_0^\infty dt_{inj}\, G_{inj}(t_{inj}) = J_{m,2}$$

40-80 MeV

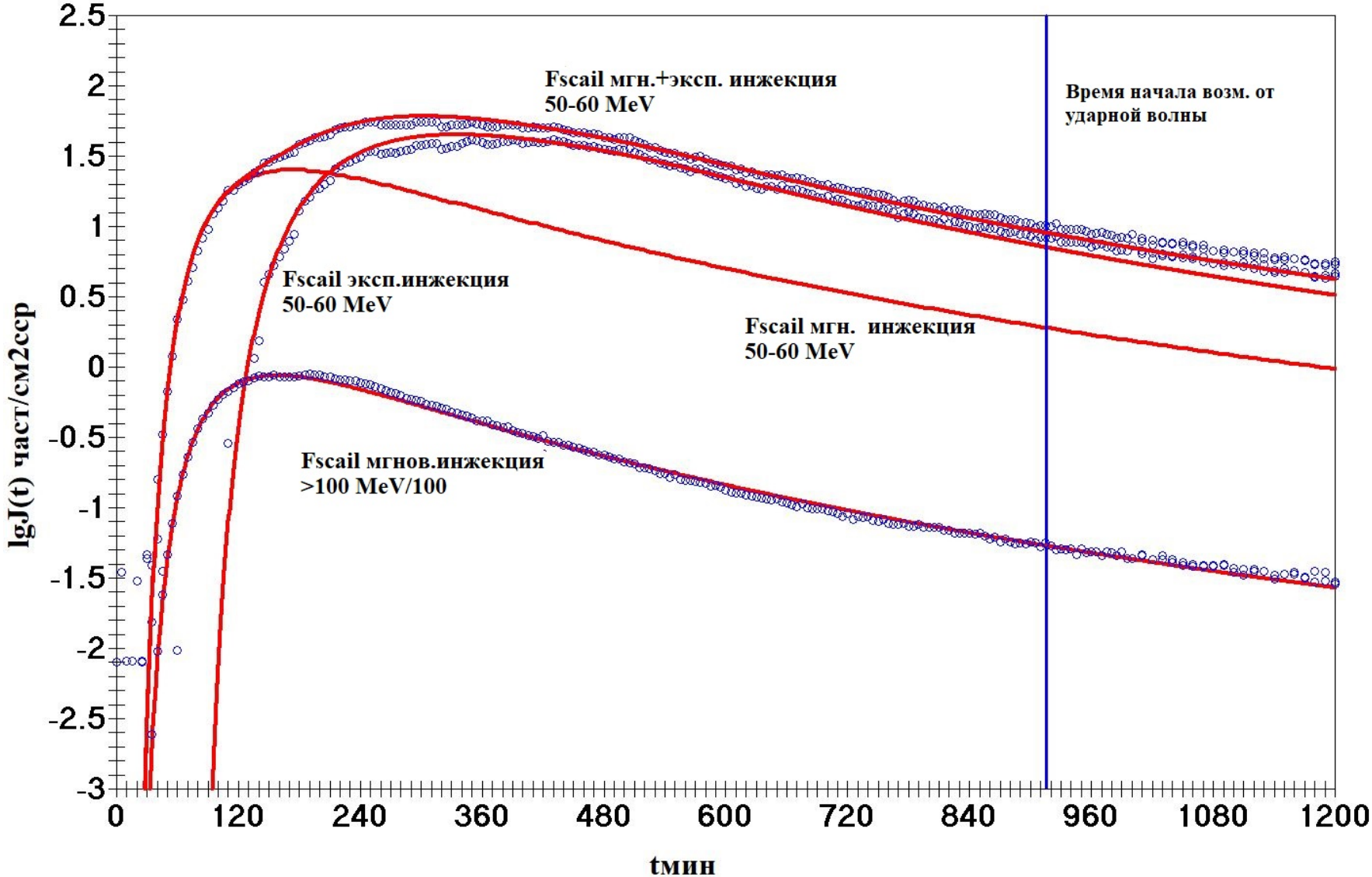
$$J_{m,1} = 4.79\frac{part}{cm2ssr}, T_m = 176min \qquad J_{m,2} = 4.89\frac{part}{cm2ssr}, T_0 = 70min$$

Jm2/Jm1=1.02



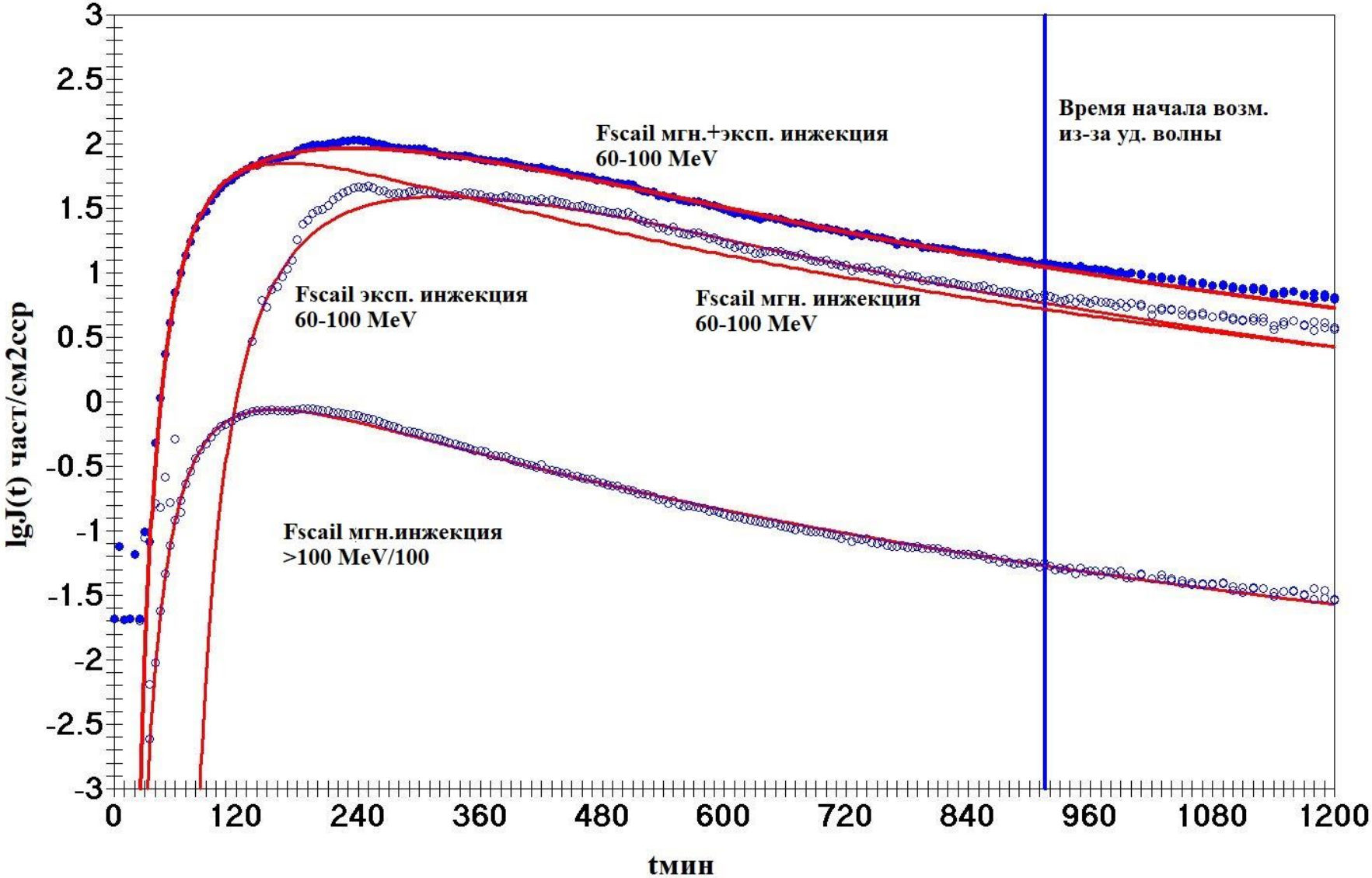
50-60MeV $J_{m,1} = 25.1\frac{part}{cm2ssr}, T_m = 172min$ $J_{m,2} = 60.25\frac{part}{cm2ssr}, T_0 = 60min$

Jm2/Jm1=2.4



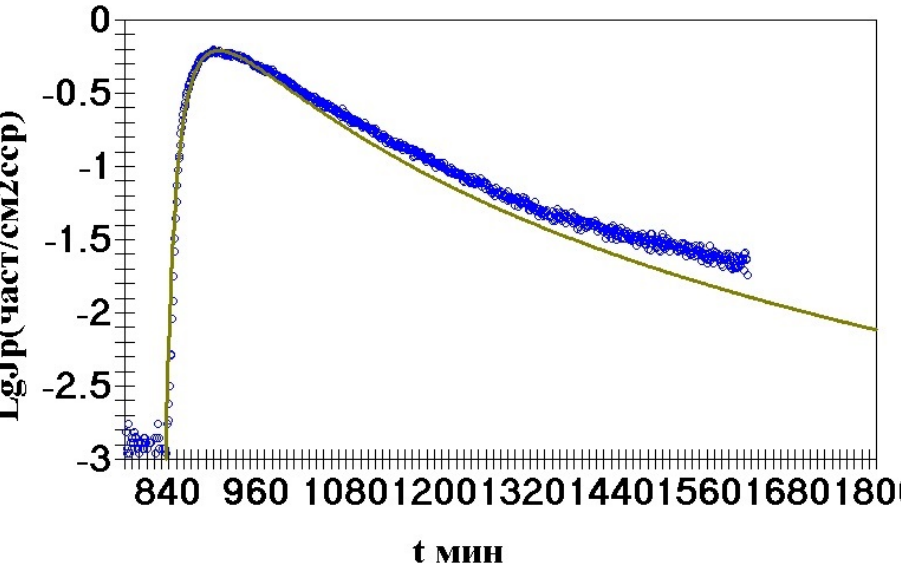
60-100 MeV $J_{m,1} = 70.8\frac{part}{cm2ssr}, T_m = 170min$ $J_{m,2} = 47.9\frac{part}{cm2ssr}, T_0 = 50min$

Jm2/Jm1=0.68

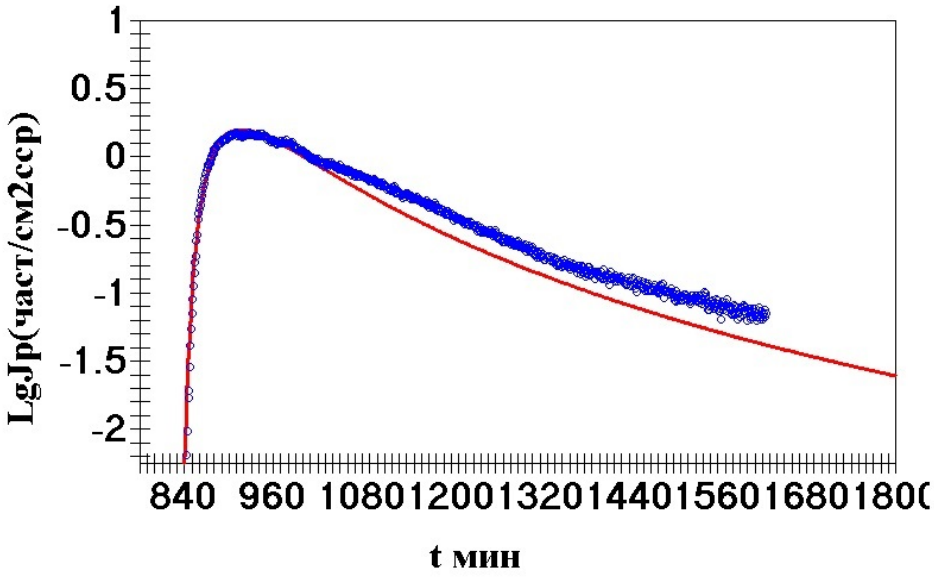


2001.04.15

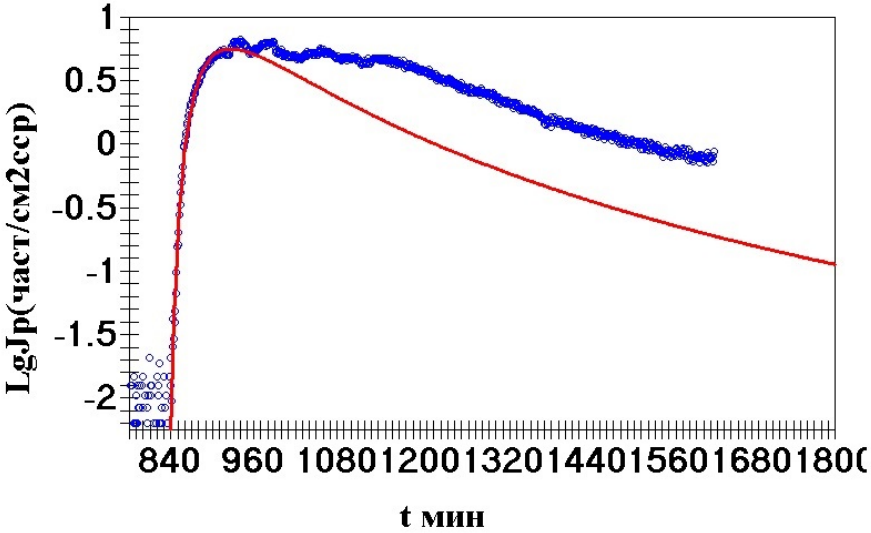
165-500 MeV мин. усреднение
Tinj=816 мин



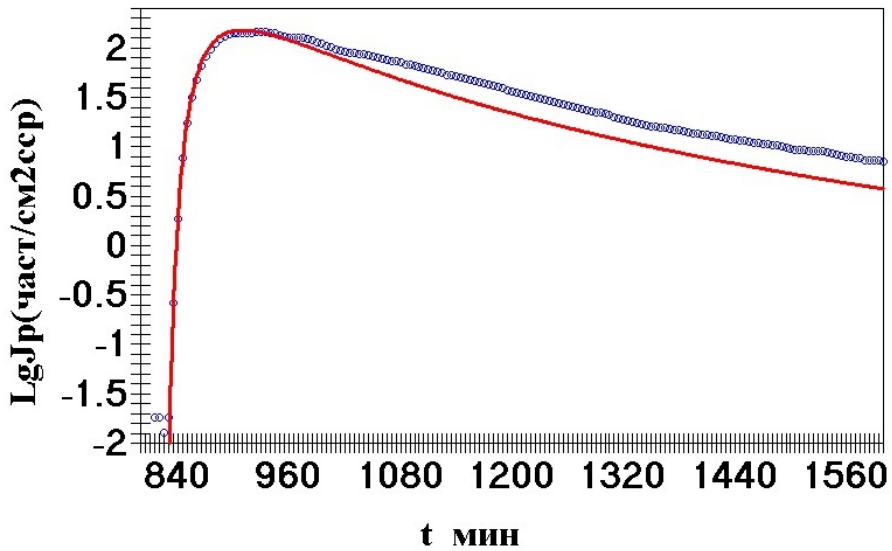
80-165 MeV мин. усреднение
Tinj=816 мин



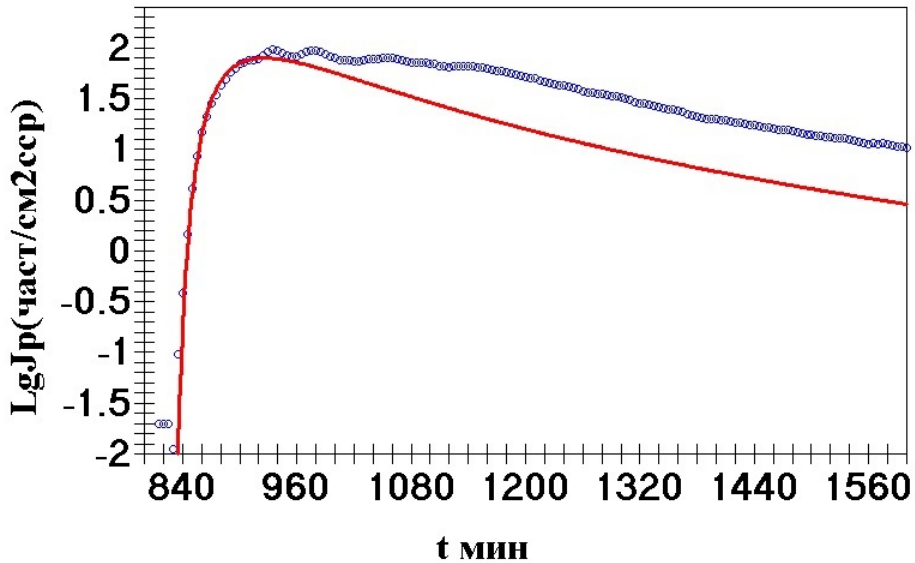
40-80 MeV мин. усреднение
Tinj=817 мин



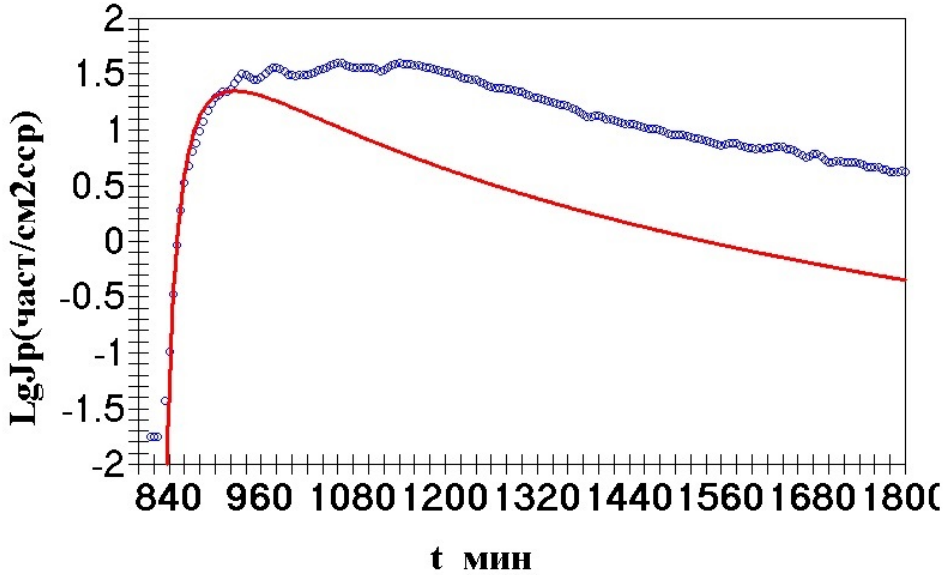
>100 MeV 5-ти мин. усреднение
Tinj=816 мин



60-100 MeV 5-ти мин. усреднение
Tinj=816 мин



50-60 MeV 5-ти мин. усреднение
Tinj=815 мин



Интерпретация временных ходов 40-80 , 80-165 ,50-60, 60-100 МэВ и >100 МэВ

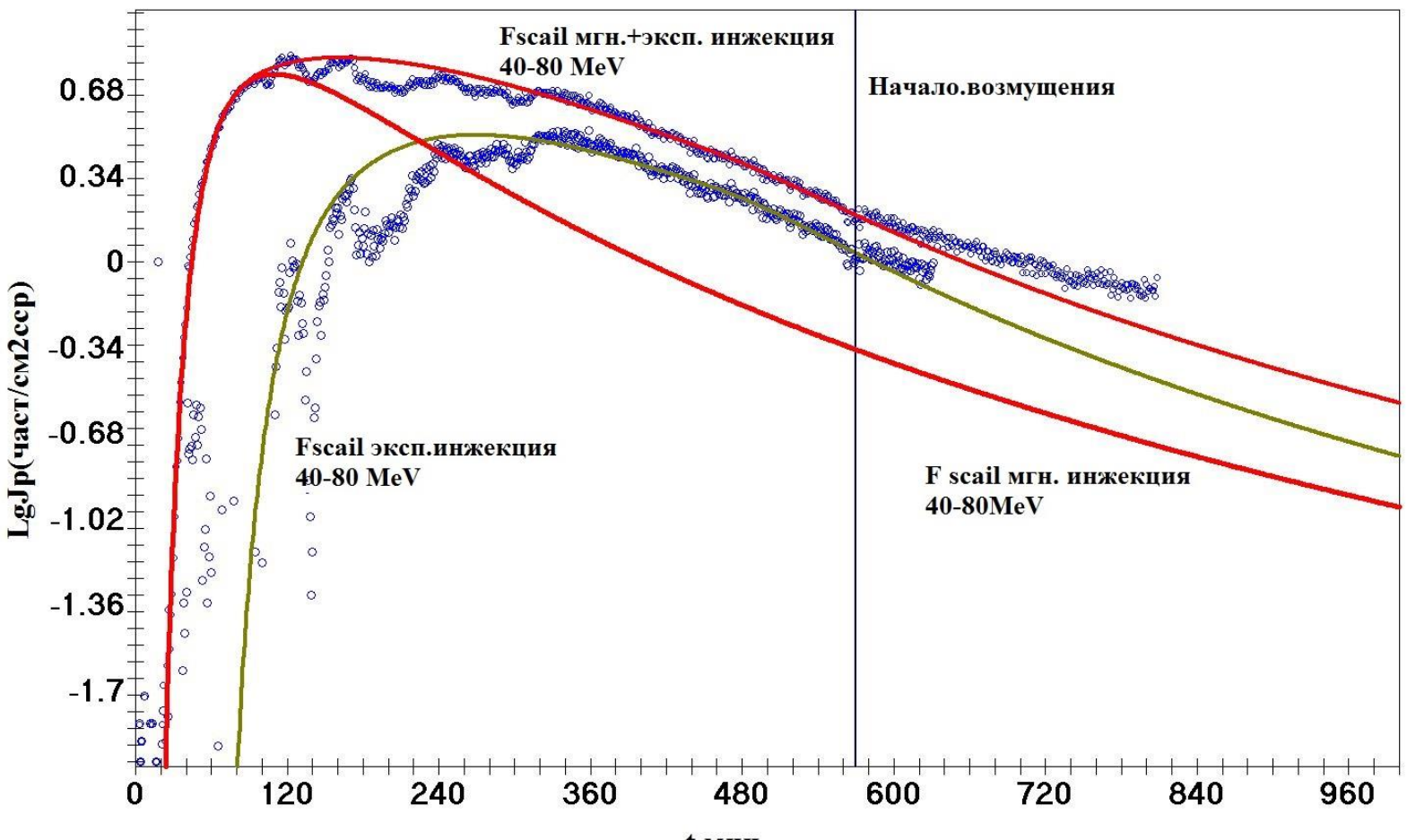
$$F_{scail} = J_{m,1}\left(\frac{T_m}{t}\right)^3 e^{3-3\frac{T_m}{t}};$$

$$G_{inj}(t_{inj}) = J_{m,2}\frac{1}{130}e^{-\frac{t_{inj}-T_0}{130}}\theta(t_{inj}-T_0); \quad \int_0^{\infty} dt_{inj}\, G_{inj}(t_{inj}) = J_{m,2}$$

Tinj0=0

40-80 MeV $J_{m,1} = 5.56\frac{part}{cm2ssr}, T_m = 110min$ $J_{m,2} = 5.75\frac{part}{cm2ssr}, T_0 = 45\,min$

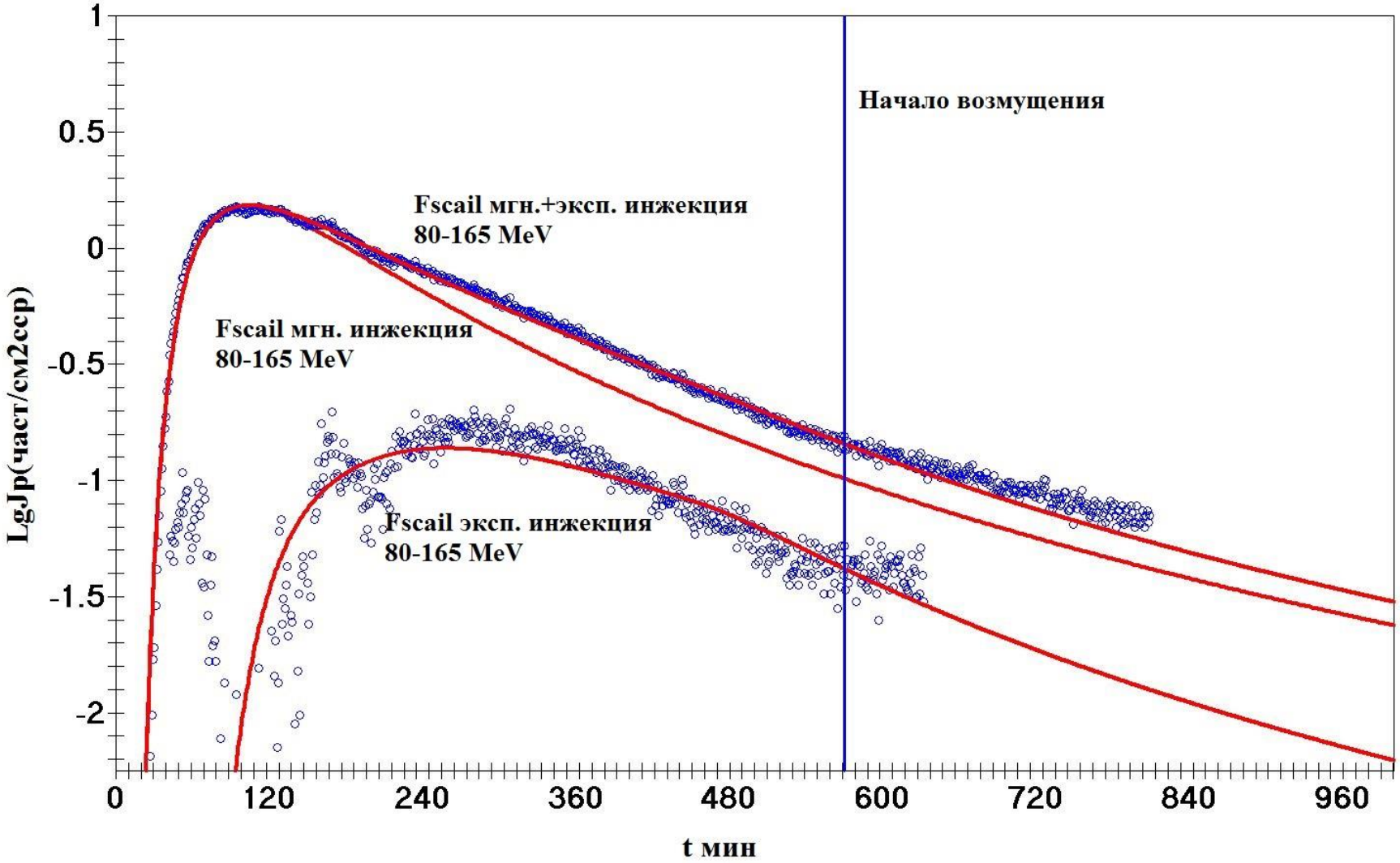
Jm2/Jm1=1.03



80-165 MeV

$$J_{m,1} = 1.51\frac{part}{cm2ssr}, \qquad T_m = 102\ min \qquad J_{m,2} = 0.26\frac{part}{cm2ssr}, \qquad T_0 = 45\ min$$

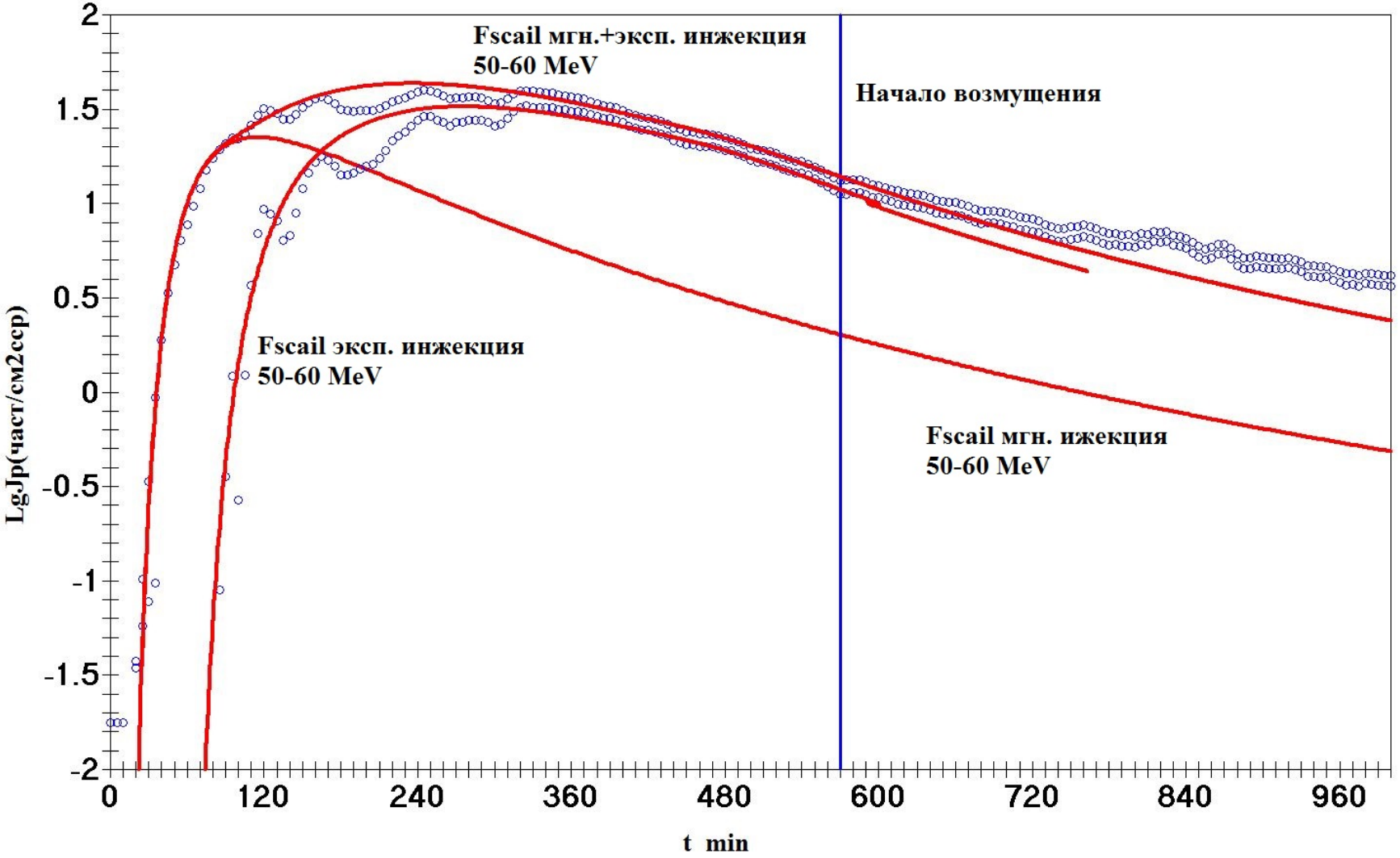
Jm2/Jm1=0.17



50-60 MeV

$J_{m,1} = 22.4 \frac{part}{cm2ssr}$, $T_m = 115\ min$ $J_{m,2} = 57.5 \frac{part}{cm2ssr}$, $T_0 = 45\ min$

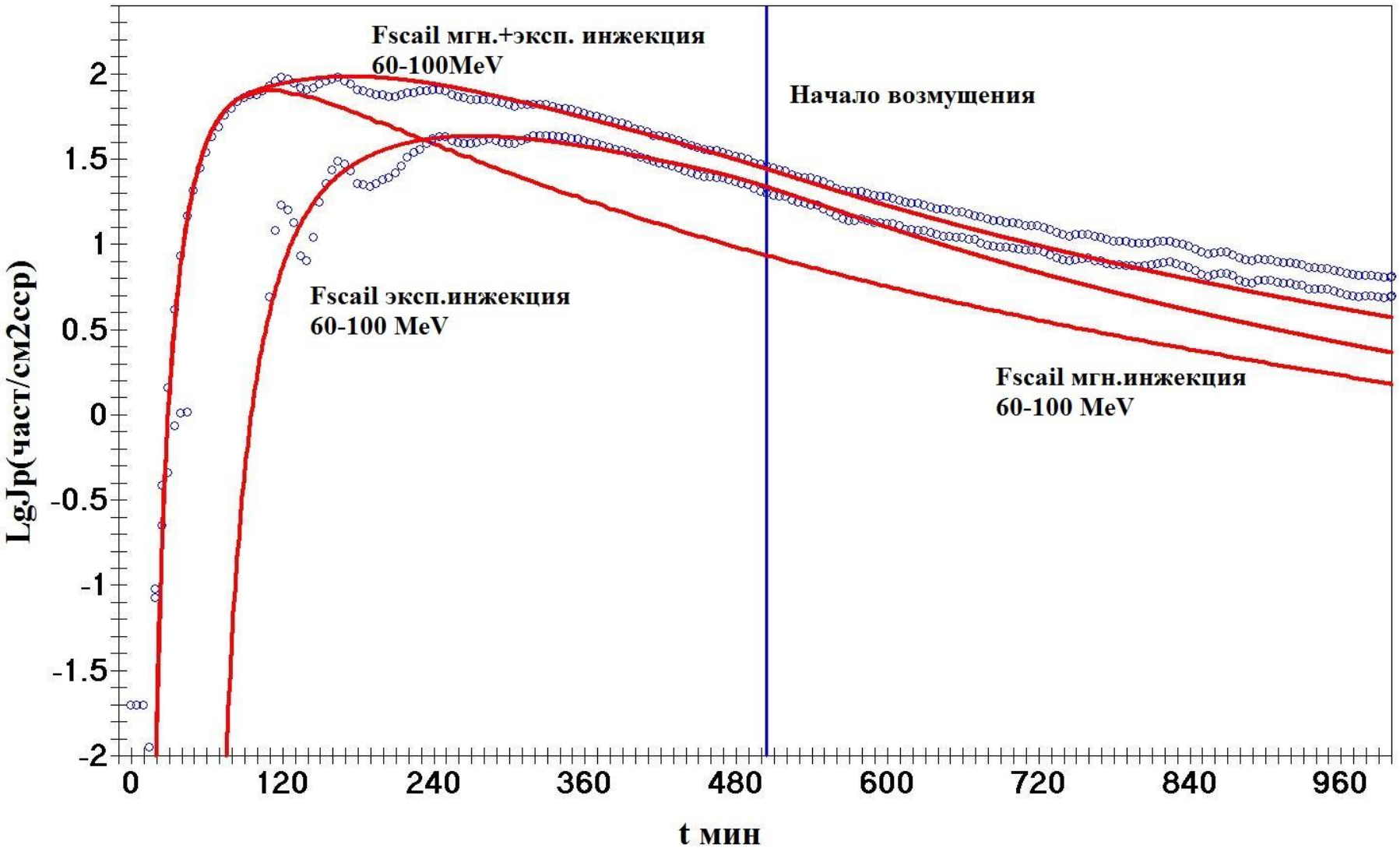
Jm2/Jm1=2.57



60-100 MeV

$$J_{m,1} = 79.43\frac{part}{cm2ssr}, \qquad T_m = 110min \qquad J_{m,2} = 77.6\frac{part}{cm2ssr}, \qquad T_0 = 48\,min$$

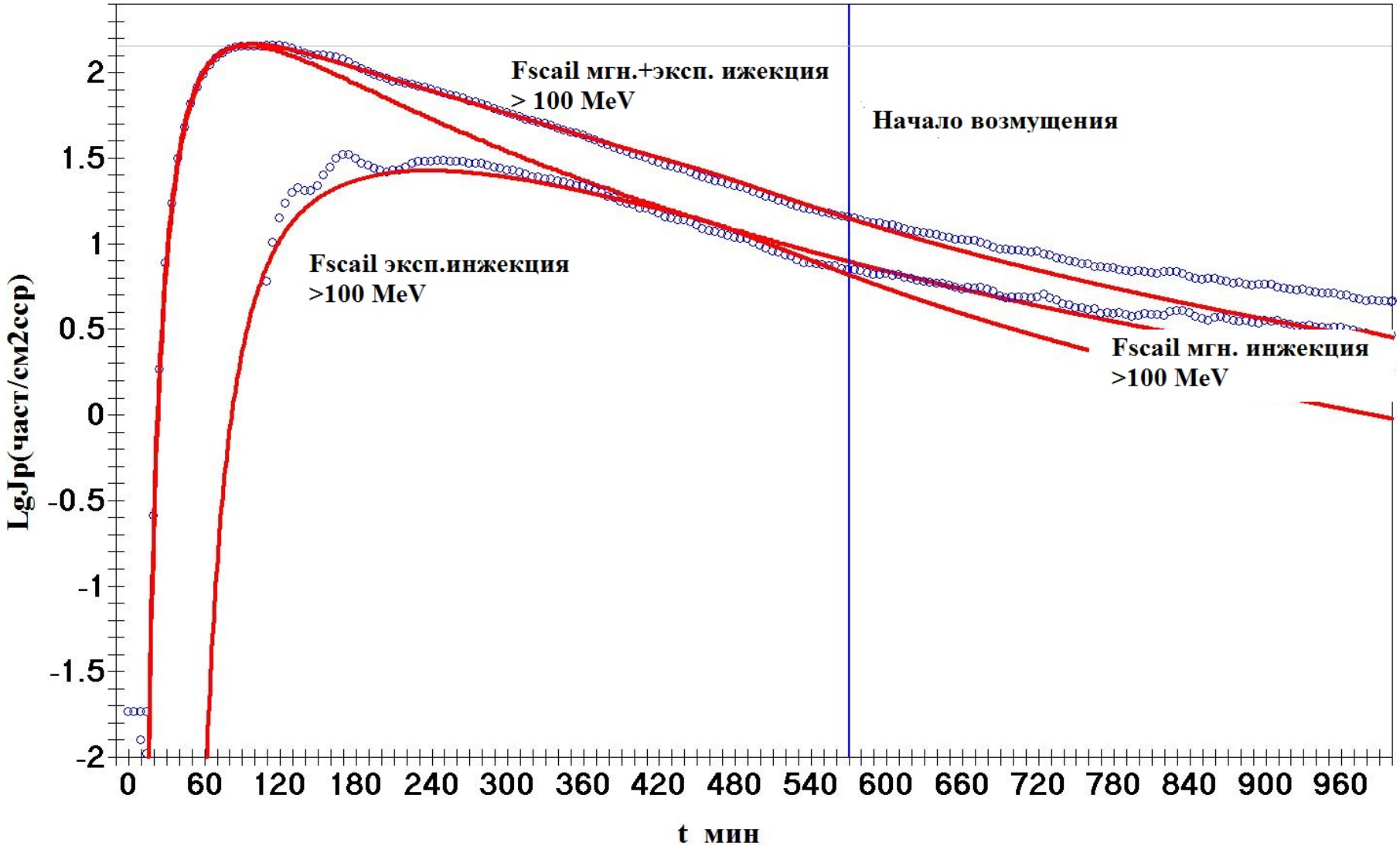
Jm2/Jm1=0.98



>100 MeV

$$J_{m,1} = 142.9\frac{part}{cm2ssr}, \qquad T_m = 94\,min \qquad J_{m,2} = 52.5\frac{part}{cm2ssr}, \qquad T_0 = 39\,min$$

Jm2/Jm1=0.37



Обсуждение рисунков

Всего было рассмотрено 8 временных ходов: 3 для события 13.12.2006 и 5 для события 15.04.2001.

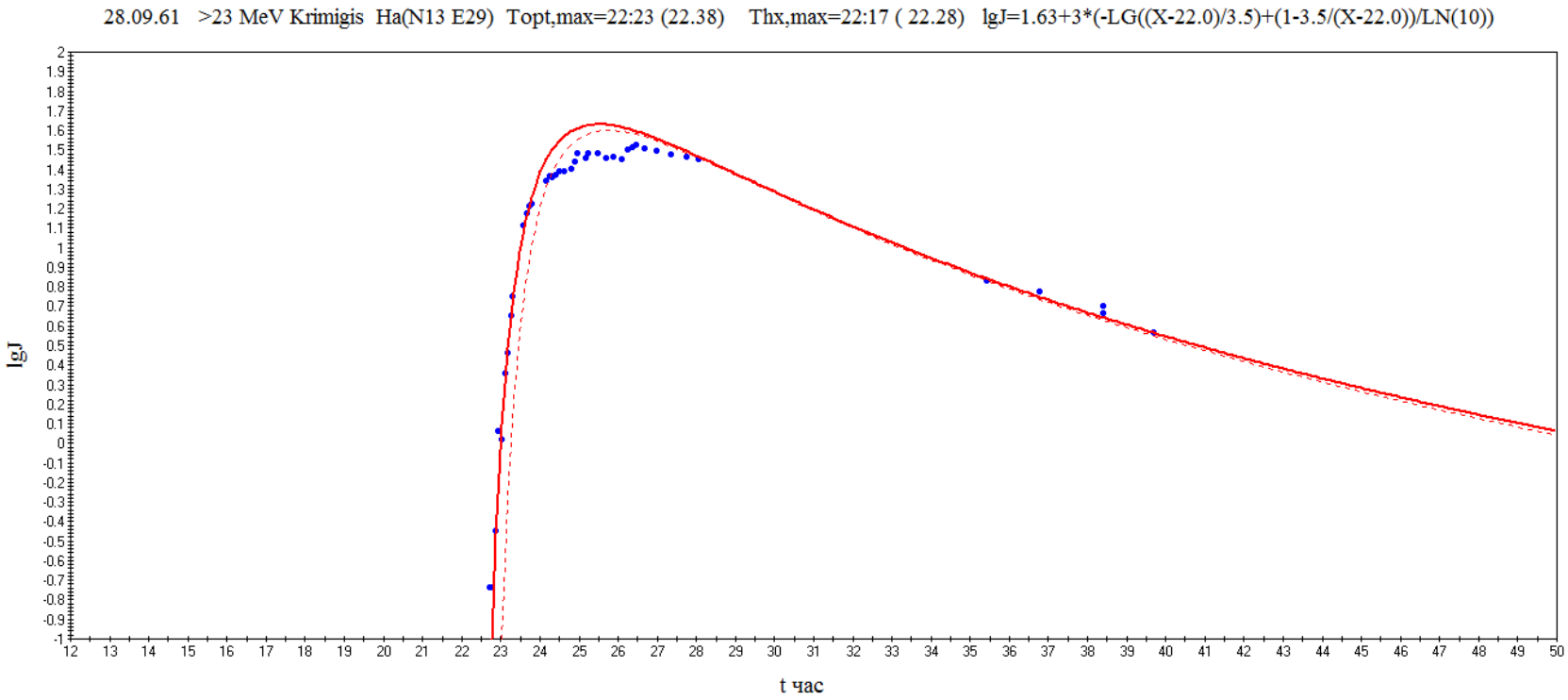
В первом событии функция скейлинга с мгновенной инжекцией хорошо описывает весь временной ход только для событий с высокой энергией (>100 МэВ , 165-500 МэВ и 80-165 МэВ). В остальных случаях ее применение приводит к срезанной вершине. Однако функция для мгновенная инжекция в этих случаях с тем же временем инжекции хорошо описывает временной ход только на части фазы роста. Остальной временной ход во всех случаях хорошо описывается суммой этой функции и функцией скейлинга для экспоненциальной инжекцией, которая начинается через 70 мин. для протонов с энергией 40-80 МэВ, через 60 мин для протонов с энергией 50-60 МэВ и через 50 мин для протонов с энергией 60-100 МэВ. Во второй инжекции было инжектировано протонов с энергией 50-60 МэВ в 2.4 раза больше чем в первой и протонов с энергией 60-100 МэВ в 1.4 раза меньше чем в первой.

Во втором событии во всех случаях функция скейлинга с мгновенной инжекцией хорошо описывает весь временной ход до максимума и часть временного хода после максимума. Весь временной ход во всех случаях как и в первом случае хорошо описывается суммой этой функции и функцией скейлинга для экспоненциальной инжекцией, которая начинается через 45 мин. для протонов с энергией 50-60 МэВ, через 48 мин для протонов с энергией 60-100 МэВ и через 39 мин для протонов с энергией >100 МэВ. Во второй инжекции было инжектировано протонов с энергией 50-60 МэВ в 2.57 раза больше чем в первой , протонов с энергией 60-100 МэВ в1.02 раза меньше чем в первой и протонов с энергией >100 МэВ в 2.7 раза меньше.

Выводы

Из полученных результатов следует ,что временные профили для целого ряда событий могут быть хорошо объяснены двойной инжекцией протонов: начальной мгновенной для всех энергий с одинаковым временем инжекции и вторичной для низкоэнергичных протонов через 30-60 минут с внезапным началом и экспоненциальным спадом, характерное время которого сравнимо с временем достижения максимума : $\Delta Tm=Tm-tinj$. Спектр протонов во второй инжекции значительно мягче, чем для первой (определяемым максимальными значениями потоков протонов). Время начала второй инжекции, в отличие от первой , зависит от энергии протонов.

Объяснение такой инжекции может заключаться в следующем: первая инжекция непосредственно связана с ускорением протонов во вспышке или в КВМ (корональный выброс массы) , а вторая - в захвате ускоренных частиц в области КВМ и истечением из нее по мере распространения КВМ. Вторую инжекцию следует учитывать при расчете спектров в источнике солнечных протонов.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

СПС 1961.09.28 > 23 МэВ N13E29 Topt,max=22:23 (22.38) Krimigis