



МАСШТАБНОЕ ПОДОБИЕ ВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ

Ю.П. Очелков

Используется метод масштабного подобия для анализа временного развития солнечных протонных событий (СПС). Показывается, что для большого числа СПС реализуется временной профиль развития, который обладает масштабным подобием. Такой временной профиль может быть назван основным или базисным. Наблюдаемое разнообразие временных профилей может быть связано с возмущениями базисного временного профиля, которые обусловлены различными причинами. Важную роль играют возмущения, связанные с длительной инжекцией частиц. Показывается, что для базисных временных профилей (по данным о потоках протонов с 5-ти минутным усреднением) можно с большой точностью (5-10 минут) определить время инжекции протонов, что в ряде случаев позволяет ответить на вопрос о том, где ускоряются протоны (в ударных волнах корональных транзиентов или в солнечных вспышках).

Ключевые слова: солнечные протонные события, временной профиль, масштабное подобие

ВВЕДЕНИЕ

Масштабное подобие для временного развития какого-либо явления означает, что для определенного достаточно большого интервала времени функция, описывающая временное развитие, содержит только один временной параметр, то есть существует один физический процесс, который определяет временное развитие на данном интервале времени. Если перейти к безразмерному времени, разделив время на данный временной параметр, и произвести нормировку масштаба событий, то временное развитие большого числа явлений будет описываться одной универсальной функцией.

Помимо явлений, которые хорошо описываются этой универсальной функцией, для временного хода большого числа событий возможны отклонения от универсальной зависимости, которые искажают временной ход, но не настолько сильно, чтобы существование универсальной зависимости не проявляло себя. То есть такую универсальную зависимость следует считать основной, которая проявляет себя даже тогда, когда она не полностью определяет временной ход. В работе [1] было показано наличие масштабного подобия для временного развития мягких рентгеновских всплесков Солнца на фазе роста до максимума. Временное развитие подавляющего большинства всплесков определяется только одним временным параметром, и отклонения от найденной универсальной зависимости практически не встречаются.

С временным развитием СПС ситуация значительно сложнее, так как существует достаточно много процессов, влияющих на их временное развитие, характерные времена для которых примерно одинаковые.

МАСШТАБНОЕ ПОДОБИЕ ДЛЯ СОБЫТИЙ СПС

В наиболее общем виде описание временного хода потоков протонов в солнечном протонном событии (СПС) в околоземном космическом пространстве (ОКП) может быть задано в виде функции (1):

$$J(t) = F(t, t_1, t_2, \dots, t_n, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_k), \quad (1)$$

где t_i – макроскопические временные параметры, характеризующие различные процессы, определяющие перенос частиц от места инжекции до ОКП; α_i – безразмерные параметры, влияющие на перенос.

К параметрам t_i можно отнести следующие :

$t_1 = R_0/v$ – время прямого прихода частиц (55 мин для $E_p=10$ МэВ, 19 мин для $E_p=100$ МэВ)

$t_2 = R_0^2/K_{II}$ – время прихода фронта диффузионной волны (2–20 часов)

$t_3 = d\varphi^2/K$ – время диффузии по гелиодолготе (10–100· t_2)

$t_4 = R_0/V_{sw}$ – время конвективного переноса (60–120 часов)

$t_5 = R_0/V_u$ – время прихода ударной волны (20–60 часов)

$t_6 = R_{diff}^2/K_{II}$ – время выхода из области диффузионного распространения (3–10· t_2)

t_7 – время коронального распространения по гелиодолготе

t_8 – время инжекции (0.1–10 часов)

t_9 – время коротации

t_{10} – время фокусировки потока частиц в расходящихся силовых линиях магнитного поля.

В различных моделях распространения солнечных протонов обычно используются различные временные параметры, которые выбираются так, чтобы хорошо описать временной ход конкретных событий, так в модели [2] и в работе [3] это t_2, α_1 , в модели [4] – t_2, t_3, α_1 , в модели [5] – t_2, t_3, t_4, t_6 .

Наиболее простая модель рассмотрена в работе [3] – это модель диффузии с коэффициентом диффузии зависящим от расстояния по степенному закону:

$$D = D_0(r/r_0)^\beta$$

Приведем здесь временную зависимость для потоков протонов в этом случае, приведенную в работе [6]:

$$J(r, t) = \frac{NvR_0^{\frac{\beta}{(\sigma+1)(2-\beta)}}}{4\pi(2-\beta)^{\frac{(2\sigma+\beta)}{(2-\beta)}} \Gamma\left(\frac{(\sigma+1)}{(2-\beta)}\right) t^{\frac{(\sigma+1)}{(2-\beta)}}} \left(\frac{1}{D_0}\right)^{\frac{(\sigma+1)}{(2-\beta)}} e^{\left(-\frac{R_0^\beta r^{2-\beta}}{D_0(2-\beta)^2 t}\right)},$$

где параметр σ определяет размерность пространства (для трехмерного пространства $\sigma=2$). Это выражение можно записать в более простом виде введя такие параметры, как поток протонов в максимуме события J_m и время достижения максимума t_m :

$$J(r, t) = J_m(t/t_m)^{\frac{(\sigma+1)}{(2-\beta)}} e^{\frac{(\sigma+1)(1-t/t_m)}{(2-\beta)^2}} \quad (2)$$

При аппроксимации этой функцией реального временного хода СПС параметр β выбирается так, чтобы как можно дольше временной ход описывался зависимостью (2). При этом β меняется не только от события к событию, но и для временного хода протонов разных энергий в одном событии.

На рисунке 1 приведен пример нахождения параметра β по временному ходу.

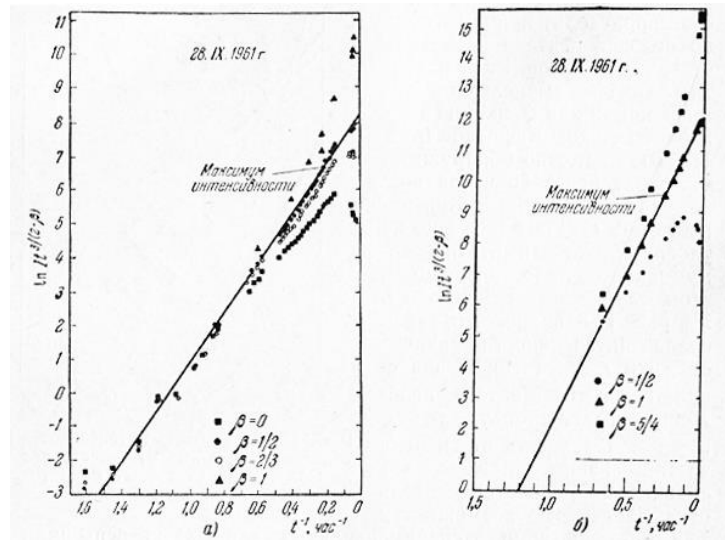


Рис. 1. Графики зависимости $\ln I t^{3/(2-\beta)}$ от t^{-1} при различных β для вспышки 28.09.1961 г. а) для протонов с энергией $E > 23$ МэВ; б) для протонов с $E = 118-150$ МэВ [6]

СЛЕДСТВИЯ ИЗ МАСШТАБНОГО ПОДОБИЯ

В случае одного временного параметра, определяющего временное развитие СПС, интенсивность потока протонов можно записать в виде: $J(t) = J_m f(t, t_1)$, где J_m – пиковая интенсивность СПС, которая достигается в момент $t = t_m$, а f безразмерная функция. Время достижения максимума t_m в силу соображений размерности линейно зависит от t_1 : $t_m = at_1$. Тогда: $J(t) = J_m f(t/t_m)$, где $f(1) = 1$. В случае масштабного подобия интегральный поток протонов за все событие (флюенс) пропорционален произведению J_m и t_m :

$$I = \int_0^\infty J_m f(t/t_m) dt = J_m t_m \text{const} \tag{3}$$

В работе [7] была построена зависимость наблюдаемых значений флюенса I_{obs} от вычисленных значений по формуле (3) – I_{calc} для 18 событий 20 цикла с энергиями протонов > 60 МэВ и > 30 МэВ. На рисунке 2 изображена зависимость для логарифмов флюенсов для энергий протонов > 60 МэВ. Коэффициенты корреляции для энергий протонов > 60 МэВ и > 30 МэВ равны значениям 0.995 и 0.991, соответственно. Наклон линии регрессии близок к 45 градусам в обоих случаях. Эти результаты показывают, что для достаточно большого числа событий время достижения максимума является основным временным параметром по крайней мере на интервале времени, за который приходит основная доля частиц от вспышки (определяющая флюенс СПС).

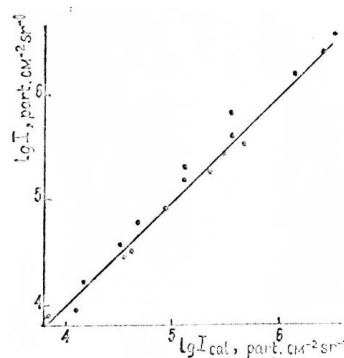


Рис. 2. Зависимость между наблюдаемыми значениями флюенса для СПС с энергиями протонов $E > 60$ МэВ и вычисленными (I_{calc}) по формуле (3) [7].

Для нахождения функции f , которая должна быть одинаковой для всех событий, удовлетворяющих свойству масштабного подобия, в работе [8] по данным наблюдения 5 событий с энергиями протонов больше 60 МэВ (СПС: 1960.10.04, 1968.09.29, 1969.02.25, 1969.02.27, 1971.04.06) была построена функция, нормированная по времени к среднему времени достижения максимума для событий от западной половины диска $\langle t_m \rangle = 5$ часам, а по пиковой интенсивности к значению $\langle J_m \rangle = 1$ част/см²ср:

$$f(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{J_i(t_{m,i})}{J_{m,i}} \langle J_m \rangle \quad (4)$$

На рисунке 3 эта зависимость представлена точками.

Если аппроксимировать функцию (3), полученную в работе [8], аналитической зависимостью, то наилучший результат аппроксимации дает следующая формула:

$$J(r, t) = J_m (t/t_m)^3 e^{3(1-t/t_m)} \quad (5)$$

На рисунке 3 приведены графики функции (4) из работы [8] и аппроксимация этой зависимости функцией (5).

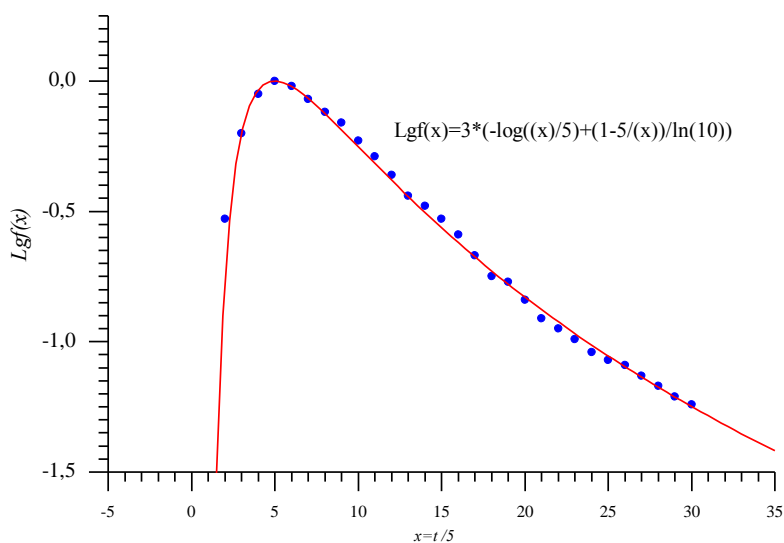


Рис. 3. График функции (4), полученной в работе [8] по данным наблюдения СПС (точки), и ее аппроксимация аналитической зависимостью (5) (сплошная линия).

Как следует из рисунка, наблюдаемая зависимость временного хода хорошо аппроксимируется зависимостью (5) в интервалах времени от $t_m / 2$ до $5t_m$.

Если сравнить зависимость (5) с формулой (2), то легко видеть, что они полностью совпадают, если для трехмерного пространства ($\sigma = 2$) принять значение β равным 1.

Такое значение β означает, что коэффициент диффузии D линейно растет с расстоянием от Солнца:

$$D \propto r \propto lv,$$

где l – длина свободного пробега, а v – скорость частиц. Так как длина свободного пробега также линейно растет с расстоянием, то имеет место пространственное масштабное подобие: две области пространства на разных расстояниях от Солнца полностью эквивалентны для рассеяния частиц и отличаются только масштабом. Характерное расстояние до фронта диффузионной волны: $r_{diff}^2 \propto Dt$

будет линейно расти со временем по закону: $r_{diff} \propto D_0/r_0 t$, так как $D = D_0 \frac{r}{r_0}$, также как и характерное расстояние для конвективного переноса частиц:

$$r_{convct} \propto Vt$$

где V – скорость солнечного ветра.

Можно показать, что временной профиль (5), который обладает свойством масштабного подобия, реализуется для большого числа СПС или играет важную роль в формировании временного профиля еще большего числа СПС.

Такой временной профиль может быть назван основным или базисным.

АППРОКСИМАЦИЯ ВРЕМЕННЫХ ХОДОВ СПС ФУНКЦИЕЙ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ БАЗИСНЫЙ ВРЕМЕННОЙ ХОД

Рассмотрим ряд примеров аппроксимации временных профилей СПС с энергиями от 10 до 100 МэВ зависимостью (5). Перечислим правила аппроксимации, которые были использованы:

1. Хорошее совпадение с данными измерений потоков протонов для энергий от 10 до 100 МэВ, как на стадии роста потоков, так и стадии спада (до момента времени, когда для потоков протонов с малыми энергиями наблюдаются возмущения временного хода).

На рисунке 4 в качестве примера приведен временной ход потоков протонов в событии 2006.12.13 с энергиями протонов > 5 , > 10 , > 30 , > 50 , > 60 , > 100 МэВ. На фазе спада наибольшие возмущения временного хода (в данном случае из-за ударной волны) заметны после вертикальной сплошной линии для энергий > 5 и > 10 МэВ, однако временной ход для протонов более высоких энергий с большой вероятностью также возмущен, и здесь можно ожидать отклонения временного хода от базисного.

Как правило, можно ожидать, что возмущения временного хода могут отсутствовать на фазе спада для времен, меньших чем $5t_m$.

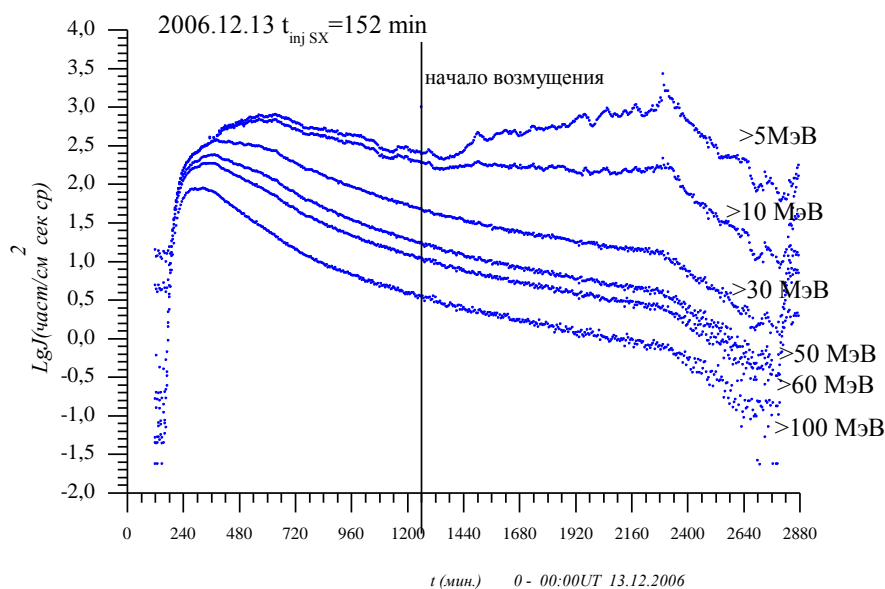


Рис. 4. Возмущения временного хода в событии СПС из-за влияния ударной волны. Начало возмущения на 1260 минуте.

2. При аппроксимации временного хода времена инъекции для протонов разных энергий должны совпадать (при 5-ти минутном усреднении потоков с точностью 5 минут, при часовом усреднении потоков с точностью до 0.25 часа). Отметим здесь, что в данном случае время

инжекции определяется из аппроксимации временного хода (в отличие от аппроксимации по моделям распространения, где время инъекции задается произвольно).

- Использование для аппроксимации только данных по потокам протонов в дифференциальных каналах (при 5-ти минутном усреднении потоков). Это особенность аппроксимации будет подробно рассмотрена ниже.

ПРИМЕРЫ БАЗИСНЫХ ВРЕМЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Рассмотрим целый ряд временных ходов СПС с часовым усреднением (Explorer) и пятиминутным усреднением (GOES), которые могут быть хорошо аппроксимированы базисным временным профилем.

На рисунках 6-21 изображены наблюдаемые временные ходы для целого ряда событий СПС с разными энергиями протонов (точки) и аппроксимация их зависимостью (сплошная линия):

$$J(r, t) = J_m \left(\frac{t - t_{inj}}{t_m - t_{inj}} \right)^3 e^{-3 \left(1 - \frac{t - t_{inj}}{t_m - t_{inj}} \right)},$$

где t_{inj} – момент инъекции.

ВРЕМЕННЫЕ ХОДЫ С ЧАСОВЫМ УСРЕДНЕНИЕМ

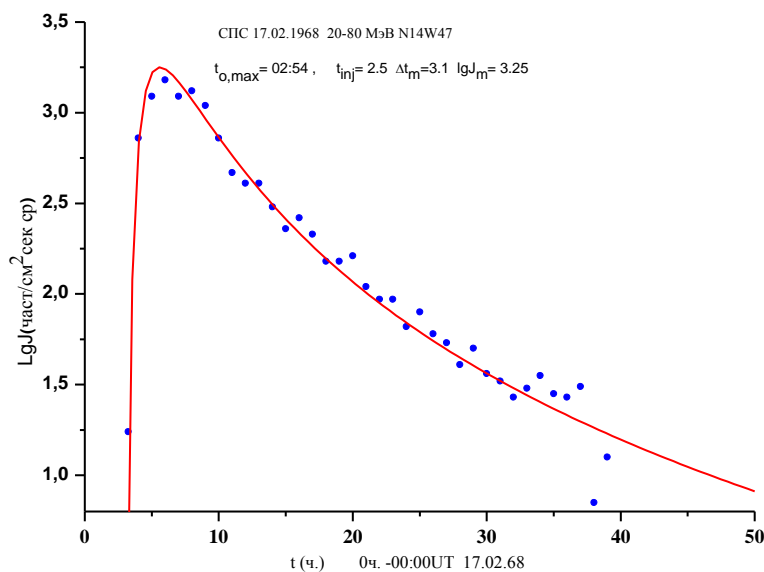


Рис. 6. Временной ход для СПС 68.02.17 с энергией протонов 20–80 МэВ (точки).
Время максимума оптической вспышки $t_{opt,max} = 2.9$ час, время инъекции для аналитической зависимости (сплошная линия) $t_{inj} = 2.5$ час.

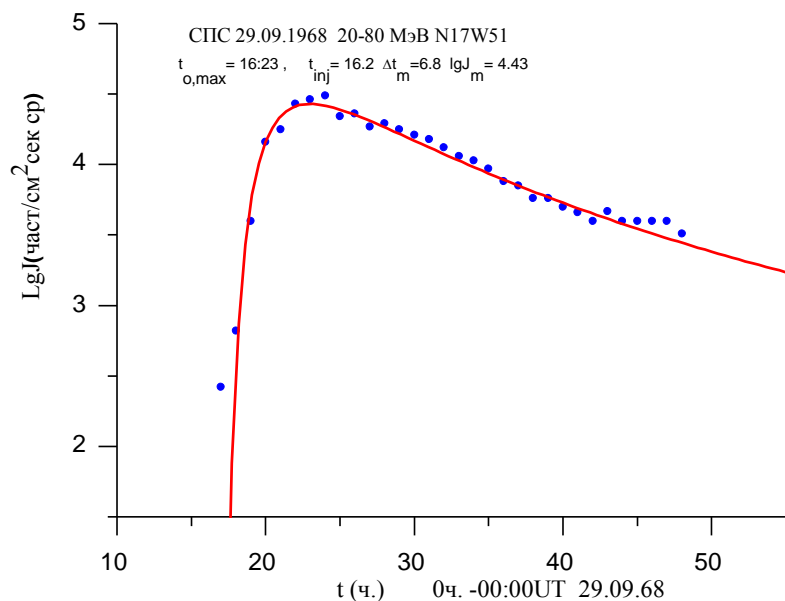


Рис. 7. Временной ход для СПС 68.09.29 с энергией протонов 20–80 МэВ (точки). Время максимума оптической вспышки $t_{opt,max}=16.4$ час, время инжекции для аналитической зависимости (сплошная линия) $t_{inj}=16.2$ час.

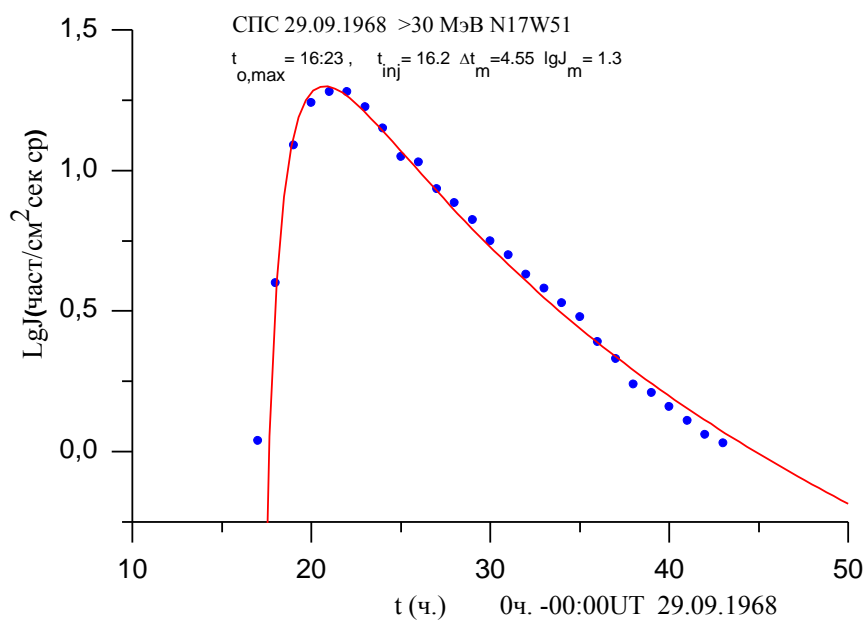


Рис. 8. Временной ход для СПС 68.09.29 с энергией протонов > 30 МэВ (точки). Время максимума оптической вспышки $t_{opt,max}=16.4$ час, время инжекции для аналитической зависимости (сплошная линия) $t_{inj}=16.2$ час (совпадает с временем инжекции для протонов 20–80 МэВ).

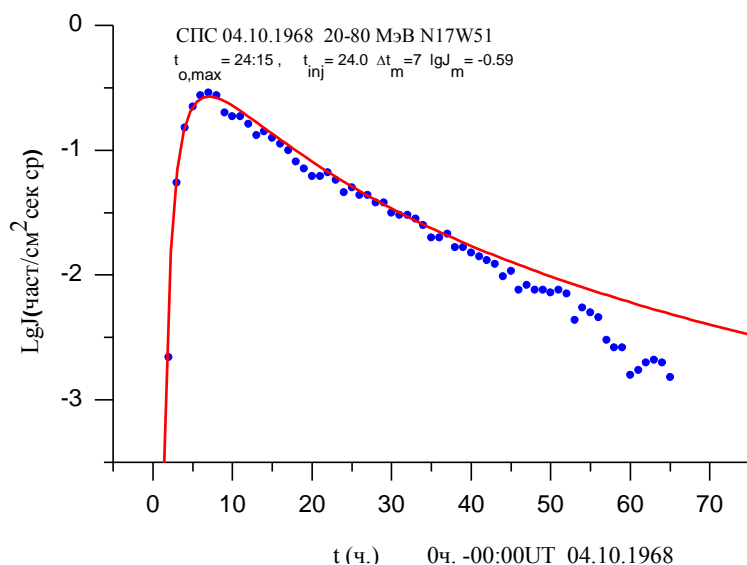


Рис. 9. Временной ход для СПС 68.10.04 с энергией протонов 20–80 МэВ (точки). Время максимума оптической вспышки $t_{opt,max} = 24.25$ час, время инжекции для аналитической зависимости (сплошная линия) $t_{inj} = 24$ час.

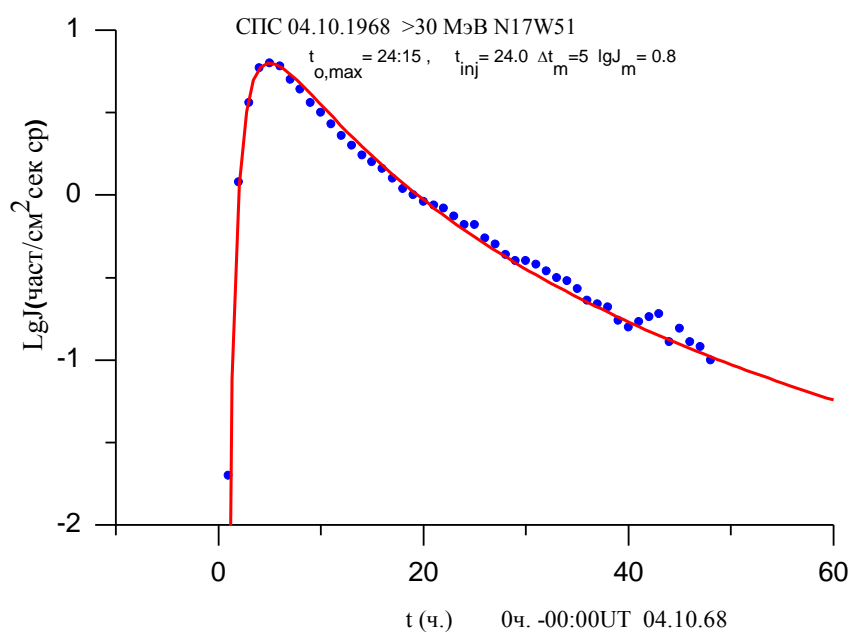


Рис. 10. Временной ход для СПС 68.10.04 с энергией протонов >30 МэВ (точки). Время максимума оптической вспышки $t_{opt,max} = 24.25$ час, время инжекции для аналитической зависимости (сплошная линия) $t_{inj} = 24$ час (совпадает с временем инжекции для протонов 20–80 МэВ).

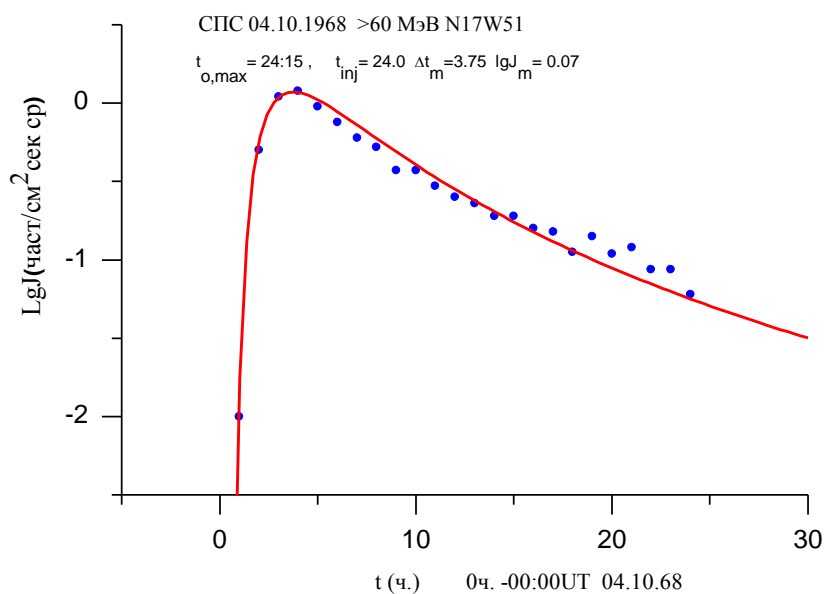


Рис. 11. Временной ход для СПИС 68.10.04 с энергией протонов >60 МэВ (точки). Время максимума оптической вспышки $t_{opt,max} = 24.25$ час, время инжекции для аналитической зависимости (сплошная линия) $t_{inj} = 24$ час (совпадает с временем инжекции для протонов 20–80 МэВ и > 30МэВ).

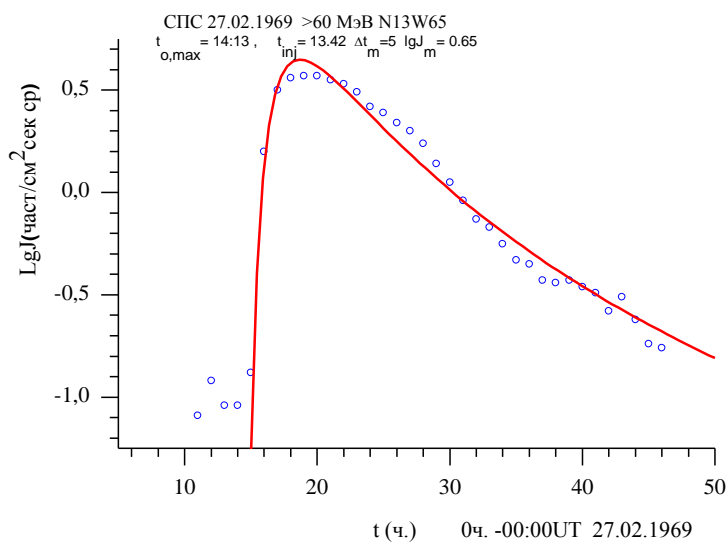


Рис. 12. Временной ход для СПИС 69.02.27 с энергией протонов >60 МэВ (точки). Время максимума оптической вспышки $t_{opt,max} = 14.2$ час, время инжекции для аналитической зависимости (сплошная линия) $t_{inj} = 13.42$ час.

ВРЕМЕННЫЕ ХОДЫ С ПЯТИМИНУТНЫМ УСРЕДНЕНИЕМ

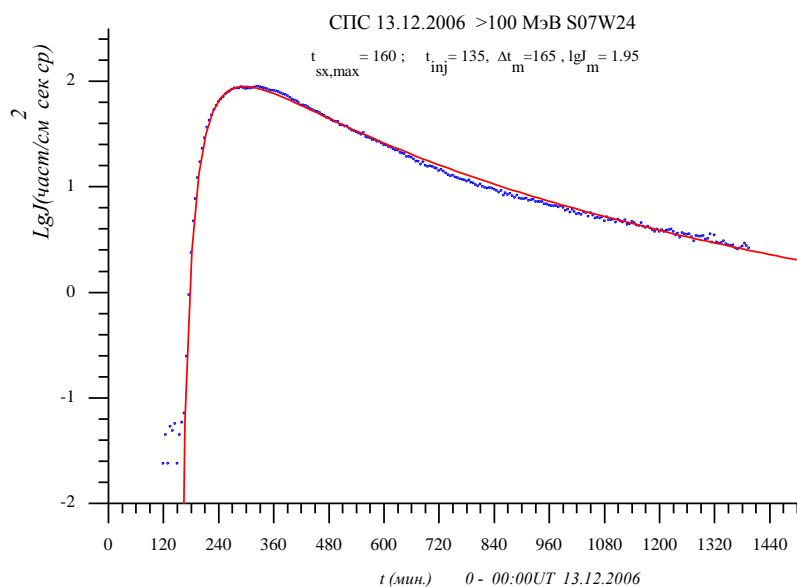


Рис. 13. Временной ход для СПС 2006.12.13 с энергией протонов >100 МэВ (GOES). Время максимума рентгеновского всплеска $t_{sx,max}=160$ мин (начало отсчета времени в 00.00 UT 13.12), время инъекции для аналитической зависимости (сплошная линия) $t_{inj}=135$ мин.

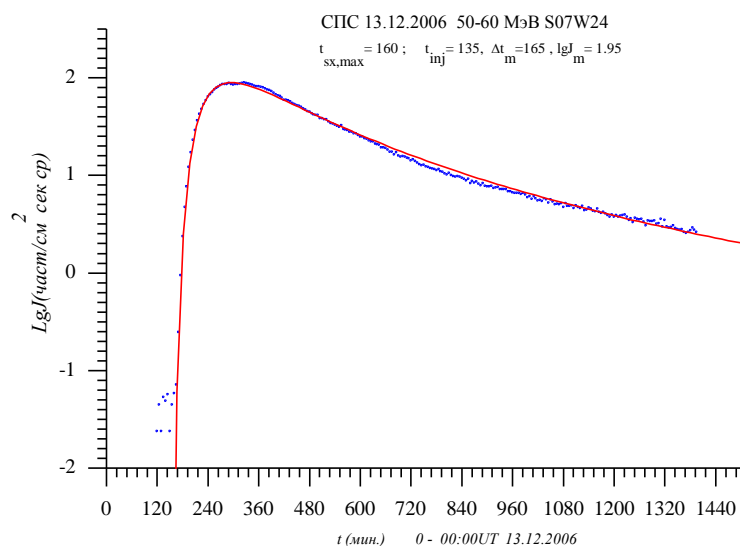


Рис. 14. Временной ход для СПС 2006.12.13 с энергией протонов 50-60 МэВ (GOES). Время максимума рентгеновского всплеска $t_{sx,max}=160$ мин (начало отсчета времени в 00.00 UT 13.12), время инъекции для аналитической зависимости (сплошная линия) $t_{inj}=135$ мин.

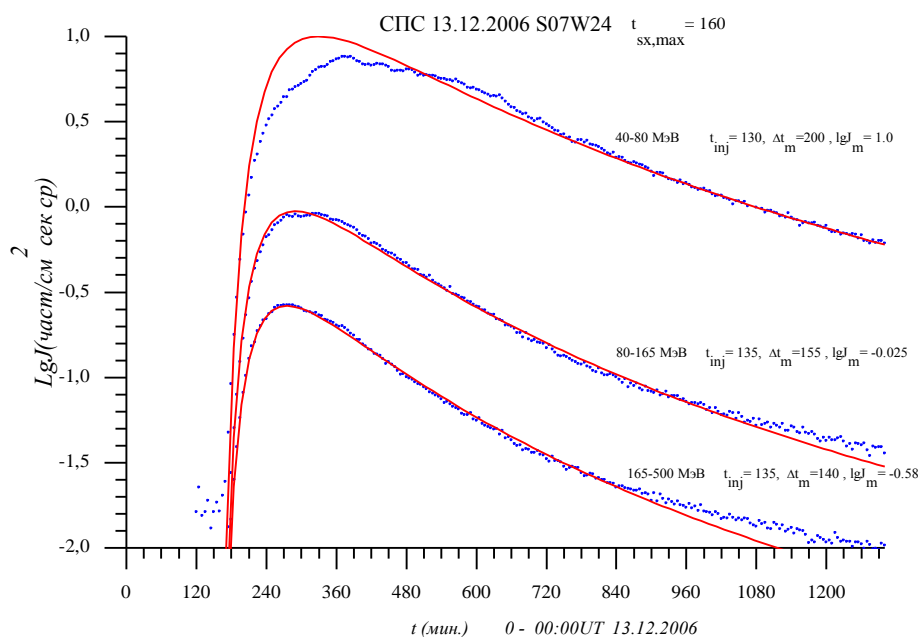


Рис. 15. Временной ход для СПС 2006.12.13 (W24) с энергиями протонов 40-80 МэВ, 80-165 МэВ, 165-500 МэВ (сверху вниз, GOES). Время максимума рентгеновского всплеска $t_{sx,max}=160$ мин (начало отсчета времени в 00.00 UT 13.12), время инъекции для аналитических зависимостей (сплошная линия) $t_{inj}=135$ мин. (совпадает с временем инъекции для протонов 50-60 МэВ).

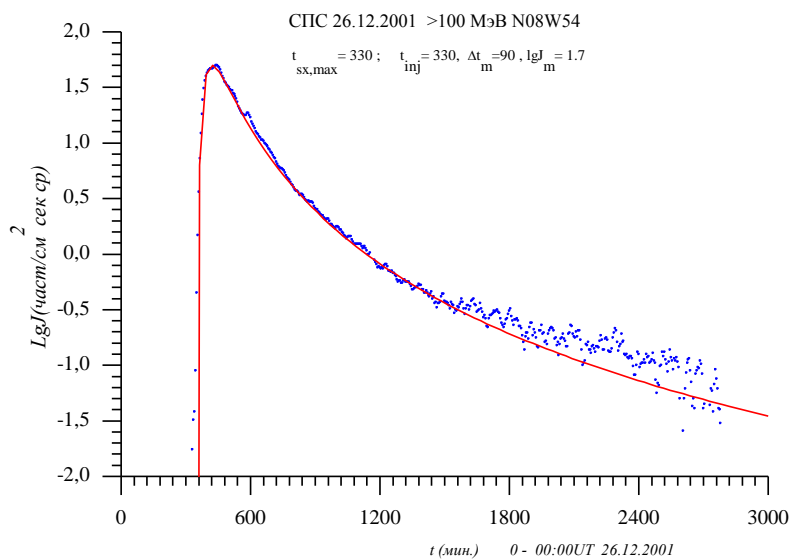


Рис. 16. Временной ход для СПС 2001.12.26 с энергией протонов >100 МэВ (GOES). Время максимума рентгеновского всплеска $t_{sx,max}=340$ мин (начало отсчета времени в 00.00 UT 26.12), время инъекции для аналитической зависимости (сплошная линия) $t_{inj}=330$ мин.

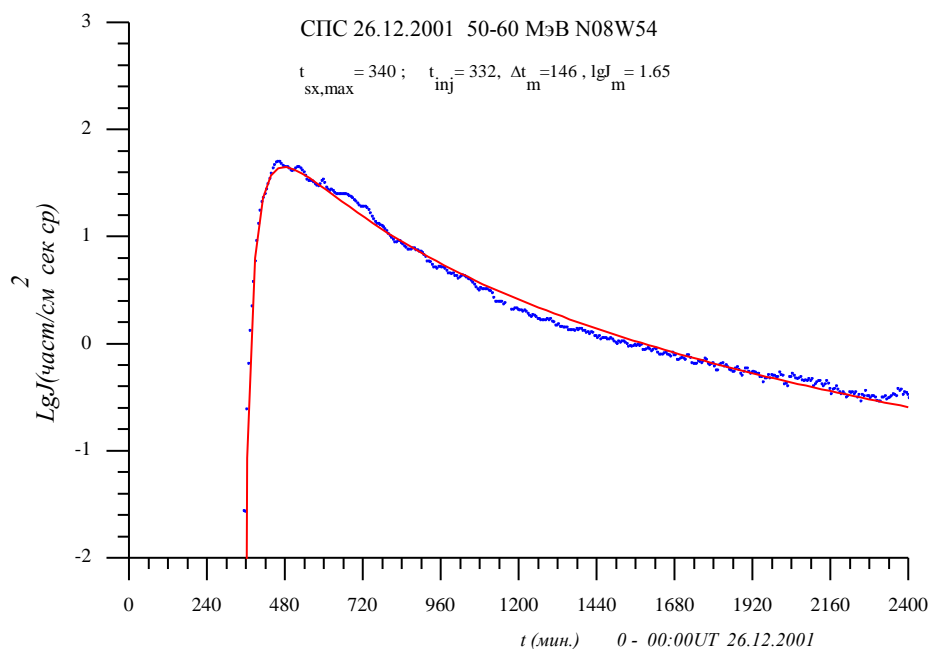


Рис. 17. Временной ход для СПС 2001.12.26 с энергией протонов 50-60 МэВ (GOES). Время максимума рентгеновского всплеска $t_{sx,max}=340$ мин (начало отсчета времени в 00.00 UT 26.12), время инжекции для аналитической зависимости (сплошная линия) $t_{inj}=332$ мин (совпадает с временем инжекции для протонов >100 МэВ).

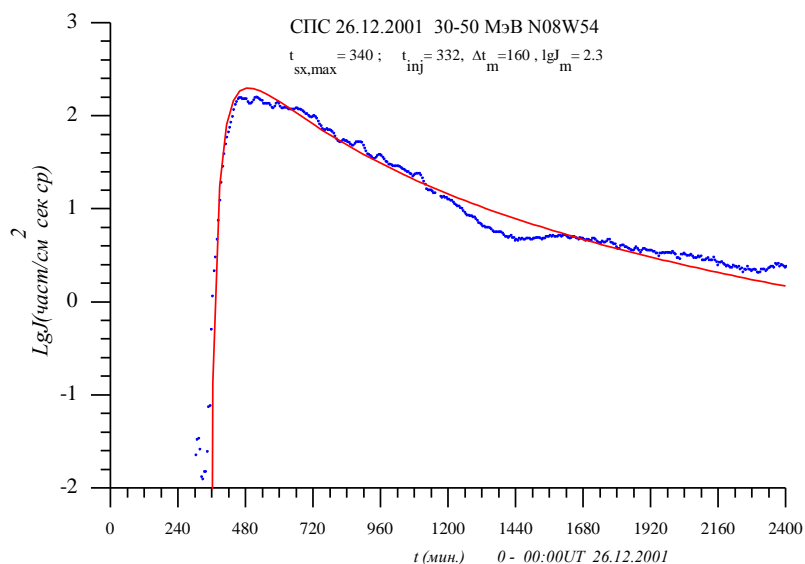


Рис. 18. Временной ход для СПС 2001.12.26 (W54) с энергией протонов 30-50 МэВ (GOES). Время максимума рентгеновского всплеска $t_{sx,max}=340$ мин (начало отсчета времени в 00.00 UT 26.12), время инжекции для аналитической зависимости (сплошная линия) $t_{inj}=332$ мин (совпадает с временем инжекции для протонов >100 МэВ и 50-60 МэВ).

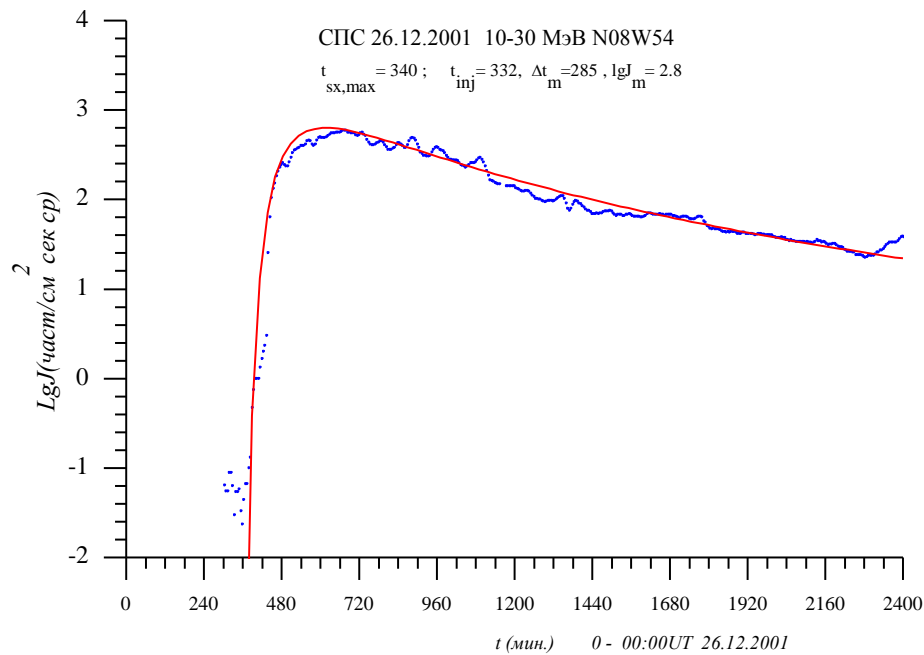


Рис. 19. Временной ход для СПС 2001.12.26 с энергией протонов 10-30 МэВ (GOES). Время максимума рентгеновского всплеска $t_{sx,max}=340$ мин (начало отсчета времени в 00.00 UT 26.12), время инъекции для аналитической зависимости (сплошная линия) $t_{inj}=332$ мин (совпадает с временем инъекции для протонов >100 МэВ, 50-60 МэВ и 30-50 МэВ).

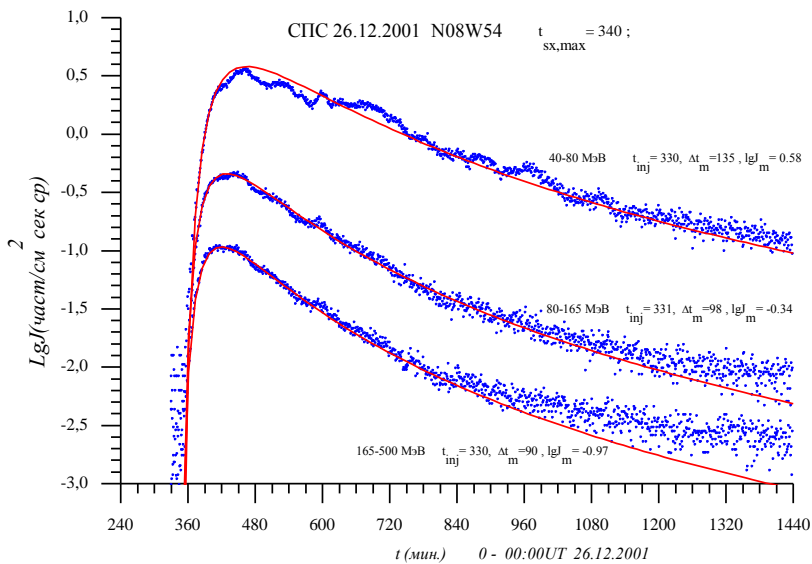


Рис. 20. Временной ход для СПС 2001.12.26 с энергиями протонов 40-80 МэВ, 80-165 МэВ, 165-500 МэВ (сверху вниз, GOES). Время максимума рентгеновского всплеска $t_{sx,max}=340$ мин (начало отсчета времени в 00.00 UT 26.12), время инъекции для аналитических зависимостей (сплошные линии) $t_{inj,4-80}=330$ мин, $t_{inj,80-165}=331$ мин, $t_{inj,165-500}=330$ мин (сверху вниз) (совпадает с временем инъекции для протонов >100 МэВ, 50-60 МэВ, 30-50 МэВ и 10-30 МэВ).

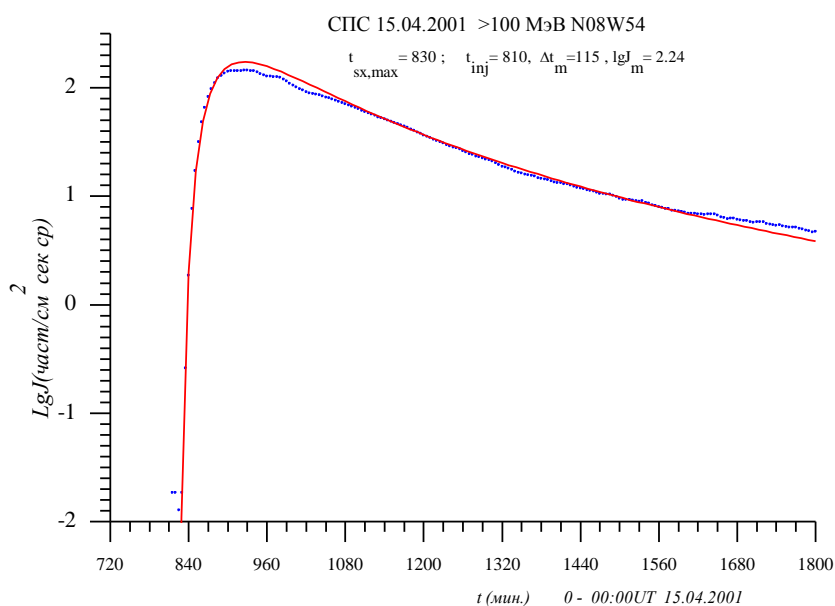


Рис. 21. Временной ход для СПС 2001.04.15 с энергией протонов >100 МэВ (GOES). Время максимума рентгеновского всплеска $t_{sx,max}=830$ мин (начало отсчета времени в 00.00 UT 15.04), время инъекции для аналитической зависимости (сплошная линия) $t_{inj}=810$ мин.

Как следует из приведенных рисунков 6-21, зависимость (5), которая соответствует масштабному подобию и содержит только один временной параметр – время достижения максимума $t_m - t_{inj}$, хорошо описывает временные ходы большого числа СПС, причем время инъекции для временного развития потоков протонов с различными энергиями оказывается одинаковым (для дифференциальных энергетических каналов).

Для интегральных каналов время инъекции при аппроксимации зависимостью (5) оказывается разным для разных пороговых энергий. Это связано с наличием дисперсии – зависимостью от энергии времени достижения максимума.

ВОЗМУЩЕНИЯ БАЗИСНОГО ВРЕМЕННОГО ХОДА

Базисный временной ход довольно часто искажается. Эти искажения наиболее заметны для временных ходов с пятиминутным усреднением. Искажения базисного временного хода можно разделить на искажения на фазе роста, фазе максимума и фазе спада СПС.

Наиболее очевидны искажения профиля на фазе спада. Одна из причин – возмущения временного хода из-за ударной волны от того же события на Солнце. Пример такого возмущения приведен на рис. 4. Характерная особенность – сильная зависимость от энергии протонов, временной ход протонов низких энергий искажается сильнее и может даже иметь второй максимум. Другие искажения наступают тогда, когда диффузионная волна достигает область пространства, для которого коэффициент диффузии имеет другое значение или имеется препятствие для свободного распространения из-за ударных волн от предыдущих вспышек. Диффузионный фронт движется со скоростью в 6-15 раз быстрее, чем солнечный ветер или фронт ударной волны. За время $5t_m$ он достигнет области пространства, расположенной в 5 раз дальше от Солнца, чем орбита Земли. Солнечный ветер в этой области был испущен примерно 15 суток назад. Поэтому искажения временного профиля для времен $> 5t_m$ весьма вероятны.

Следует отметить, что искажения временного профиля на фазе спада при аппроксимации временного хода базисным временным профилем, как правило, не приводят к ошибкам в определении времени инъекции протонов. Наиболее сильно на определении времени инъекции сказываются возмущения на фазе роста СПС и фазе максимума.

К наиболее важным возмущениям временного профиля на фазе роста следует отнести возмущения временного хода, связанные с наличием дисперсии (зависимости от энергии) времени

достижения максимума протонных событий. Действительно, временные ходы протонов для интегральных энергетических каналов хорошо могут быть аппроксимированы базисным временным ходом, но при этом моменты инжекции протонов оказываются зависящими от пороговых энергий каналов и не согласуются по времени ни с характерными временами рентгеновских всплесков или выбросов корональных масс (примеры этого показаны на последующих рисунках 22–28).

Временные профили, искаженные дисперсией, могут быть аналитически вычислены в предположении логарифмической зависимости времени достижения максимума от энергии:

$$t_m(E) = t_{m,0} \lg(E_*/E), \tag{6}$$

где E_* – фиксированная энергия.

Такая зависимость является оправданным предположением, так как при изменении энергии на порядки изменения времени достижения максимума невелико, в 1.5–2 раза.

Подставляя (6) в формулу (5), в предположении степенного спектра в максимуме СПС в виде $J_m(E) = J_m(E_0) \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\gamma_m}$, и интегрируя по энергии от E_1 до E_2 , получим следующее выражение для зависимости от энергии плотности потока протонов:

$$J(t, E_1 \div E_2) = \int_{E_1}^{E_2} J(t, E) dE = f(t, E_1) g(t, E_1, \alpha) - f(t, E_2) g(t, E_2, \alpha), \tag{7}$$

где:

$$f(t, E) = \frac{J_m(E_0)}{\gamma_m - 1} \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\gamma_m} E \left(\frac{t_m(E)}{t}\right)^3 e^{\left(3 - 3\frac{t_m(E)}{t}\right)}$$

$$g(t, E, \alpha) = \frac{\gamma_m - 1}{\alpha + 1} \left(1 - \frac{3}{(\alpha + 1)} \cdot \frac{1}{\ln(E/E_*)} + \frac{6}{(\alpha + 1)^2} \cdot \frac{1}{\ln^2(E/E_*)} - \frac{6}{(\alpha + 1)^3} \cdot \frac{1}{\ln^3(E/E_*)} \right)$$

$$\alpha(t) = \left(\frac{3t_{m,0}}{t \ln 10} - \gamma_m \right)$$

На рисунке 22 построены (точки) рассчитанные по формуле (7) временные ходы для интегрального канала с пороговой энергией 30 МэВ в случае, когда инжекция протонов с энергией 30 МэВ произошла в нулевой момент времени. Время максимума для потоков протонов с энергией 30 МэВ равнялось 240 мин, а $E_*=1000$ МэВ. Показатели спектра в максимуме событий равны 2, 3, 4, 5 (сверху вниз). Эти временные ходы аппроксимировались базисной зависимостью (5) (сплошные линии на рис. 22)

Как следует из рисунка, такая аппроксимация достаточно хорошо описывает рассчитанный временной ход (с небольшими отклонениями вблизи максимума для жестких спектров с $\gamma_m=2$ и 3) однако при этом время инжекции существенно отличается от нулевого момента, инжекция для такой аппроксимации происходит раньше чем для временного хода протонов одной энергии: при $\gamma_m=2$ на 33 минуты, при $\gamma_m=3$ на 23 минуты, при $\gamma_m=4$ на 10 минут, при $\gamma_m=5$ на 3 минуты. Мы видим, что для $\gamma_m=5$ временной ход для интегрального канала практически не отличается от временного хода для дифференциального канала.

Таким образом, наличие дисперсии приводит к тому, что хотя временной ход для интегральных каналов неплохо может быть аппроксимирован базисным временным ходом, момент инжекции для базисного временного хода должен быть выбран значительно раньше. Аналогичные результаты следуют для временного хода с энергией протонов 60 МэВ (см. рис. 23). Переход к интегральным каналам приводит к сдвигу момента инжекции на 17 минут раньше чем реальная для $\gamma_m=2$, на 10 минут раньше для $\gamma_m = 3$ и на 3 минуты раньше для $\gamma_m = 4$ (это справедливо для времени достижения максимума 120 минут). Здесь изменения в моменте инжекции меньше, чем для 30 МэВ. Для энергий 100 МэВ эти изменения еще меньше, и ими часто можно пренебречь.

Сдвиг момента инжекции зависит не только от рассматриваемой пороговой энергии, но и от времени достижения максимума. При больших временах максимума он значительно больше (см. рис. 24)

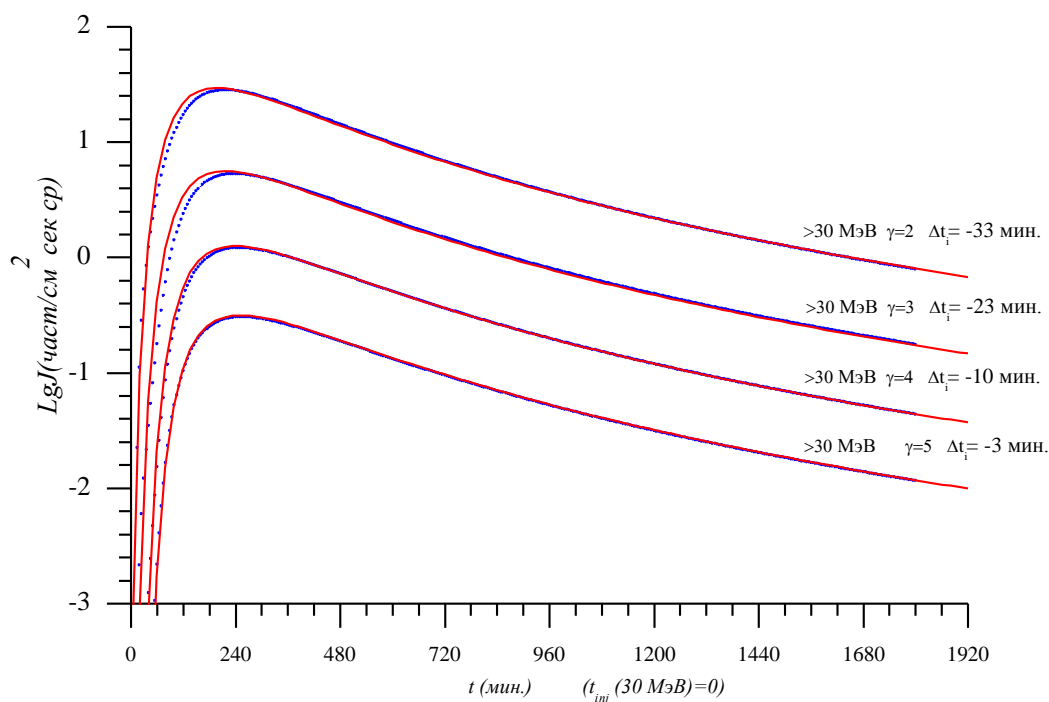


Рис. 22. Точки – временные ходы, рассчитанные по формуле 7 для интегрального канала $E > 30$ МэВ, инжекция протонов с энергией 30 МэВ в нулевой момент времени, время достижения максимума для них 240 мин. Сверху вниз для $\gamma_m=2, 3, 4, 5$. Сплошные линии аппроксимация базовой зависимостью.

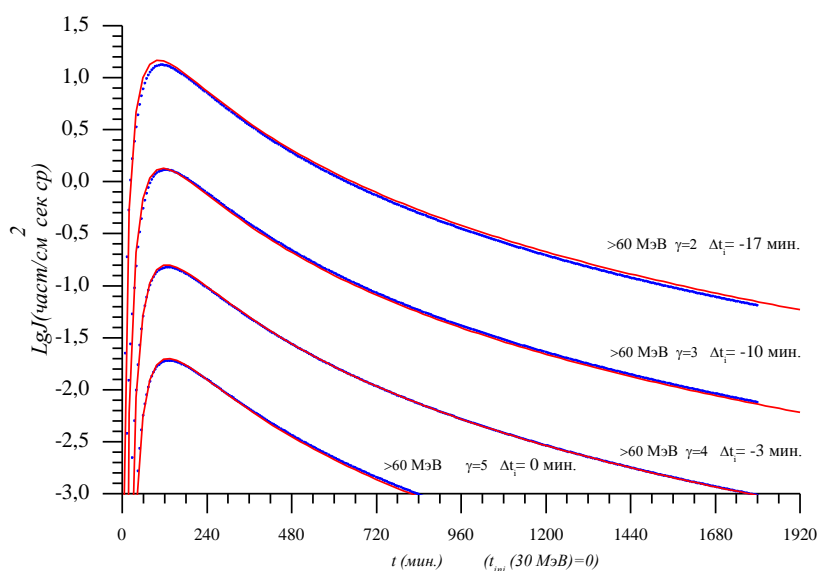


Рис. 23. Точки – временные ходы, рассчитанные по формуле 7 для интегрального канала $E > 60$ МэВ, инжекция протонов с энергией 60 МэВ в нулевой момент времени, время достижения максимума для них 120 мин. Сверху вниз для $\gamma_m=2, 3, 4, 5$. Сплошные линии аппроксимация базовой зависимостью.

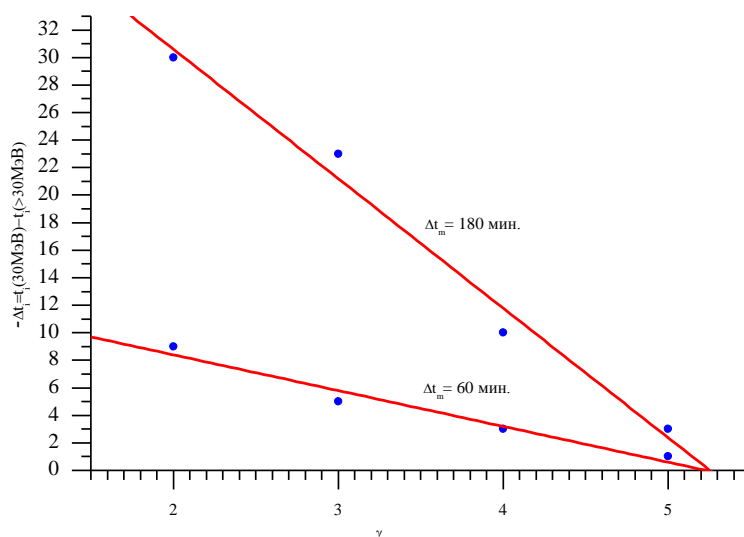


Рис. 24. Сдвиг по времени в моменте инжекции в зависимости от показателя спектра γ_m при аппроксимации базисной зависимостью данных по потокам протонов для интегрального канала (> 30 МэВ) и дифференциального канала (30 МэВ) ($t_{inj, 30} - t_{inj, > 30}$) для разных времен достижения максимума для протонов с энергией 30 МэВ: 180 минут верхняя кривая, 60 минут – нижняя.

Рассмотрим теперь не смоделированные, а реальные временные ходы. На рисунках 25 и 26 показаны временные ходы для события 2001.12.26. Из них видно, что наблюдается сдвиг для момента инжекции для интегральных каналов при аппроксимацией базисной зависимостью. Так время инжекции для канала 10-30 МэВ равна 332 мин., для канала 30-50 МэВ тоже 332 мин., а для каналов >10 МэВ – 290 мин. и >30 МэВ – 315 мин., то есть 42 мин. и 17 мин. раньше.

На рисунке 27 приведены временные ходы для интегрального (>50 МэВ) и дифференциальных каналов (50-60 МэВ) для события 2006.12.13, а на рис. 28 для интегрального (> 60 МэВ) и дифференциальных каналов (60-100 МэВ) для события 2001.04.15. Здесь наблюдаются сдвиги на 15 мин. и 5 мин.

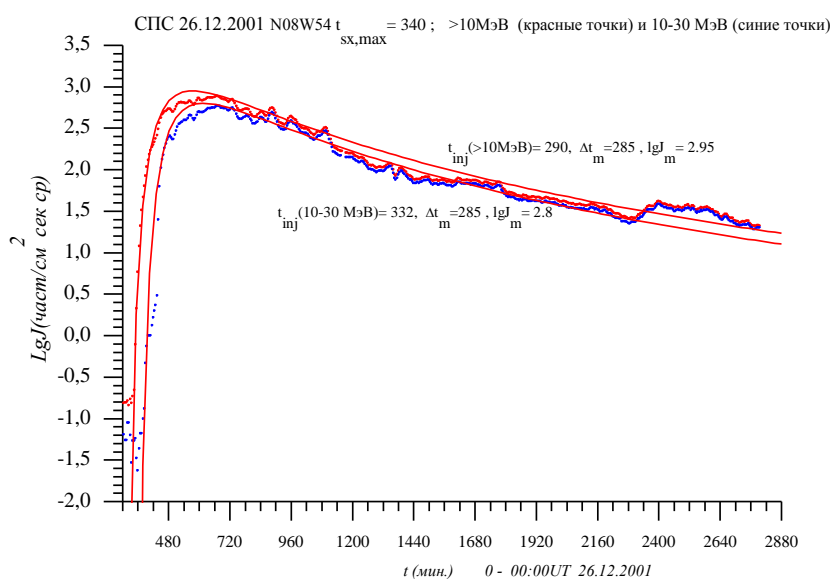


Рис. 25. Временные ходы для интегрального канала (>10 МэВ) (левая кривая) и дифференциального канала (10-30) МэВ (правая кривая) для события 2001.12.26

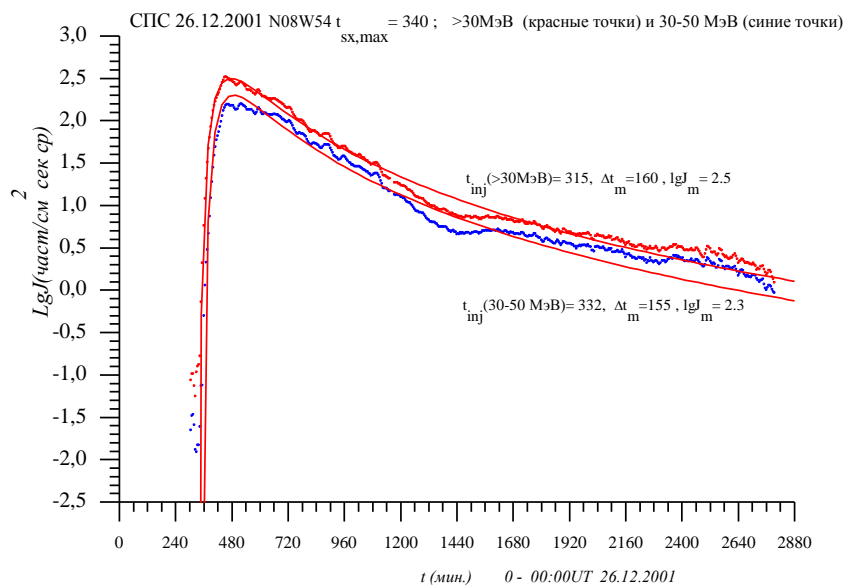


Рис. 26. Временные ходы для интегрального канала (> 30 МэВ) (левая кривая) и дифференциального канала (30-50) МэВ (правая кривая) для события 2001.12.26 (время инъекции дифференциальных каналов (10-30) МэВ и (30-50) МэВ совпадают).

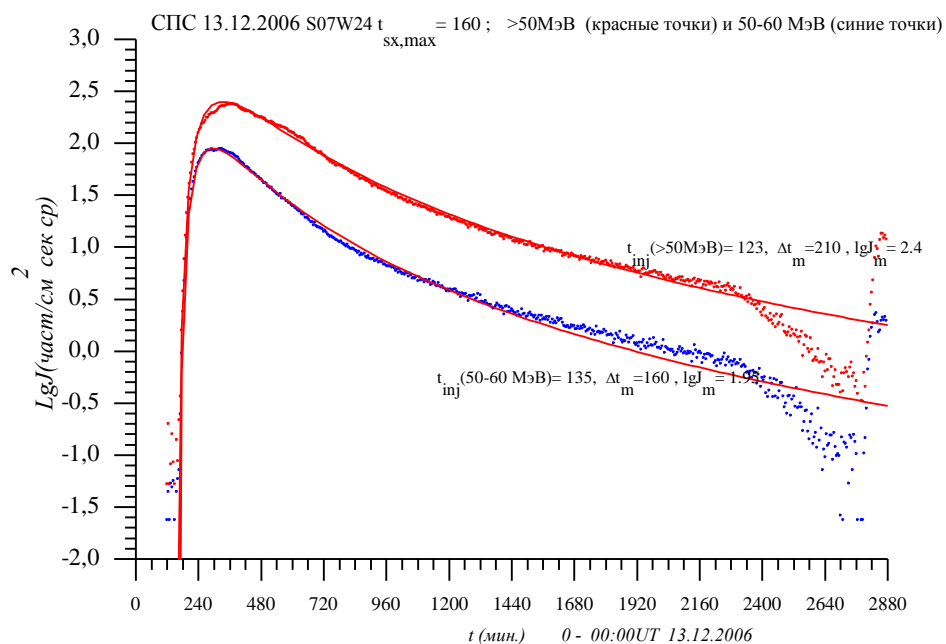


Рис. 27. Временные ходы для интегрального канала (> 50 МэВ) (левая кривая) и дифференциального канала (50-60) МэВ (правая кривая) для события 2006.12.13

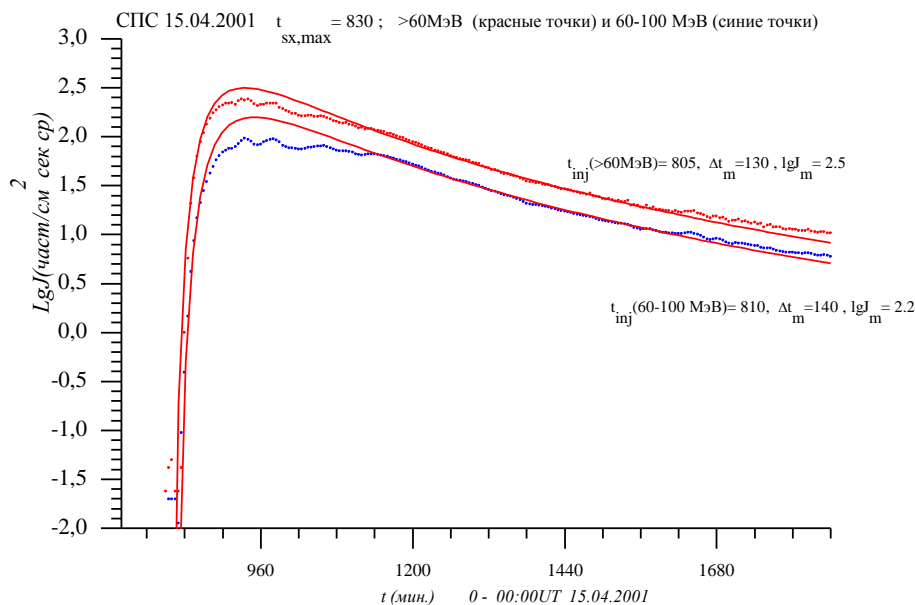


Рис. 28. Временные ходы для интегрального канала (> 60 МэВ) (левая кривая) и дифференциального канала (60-100) МэВ (правая кривая) для события 2001.04.15.

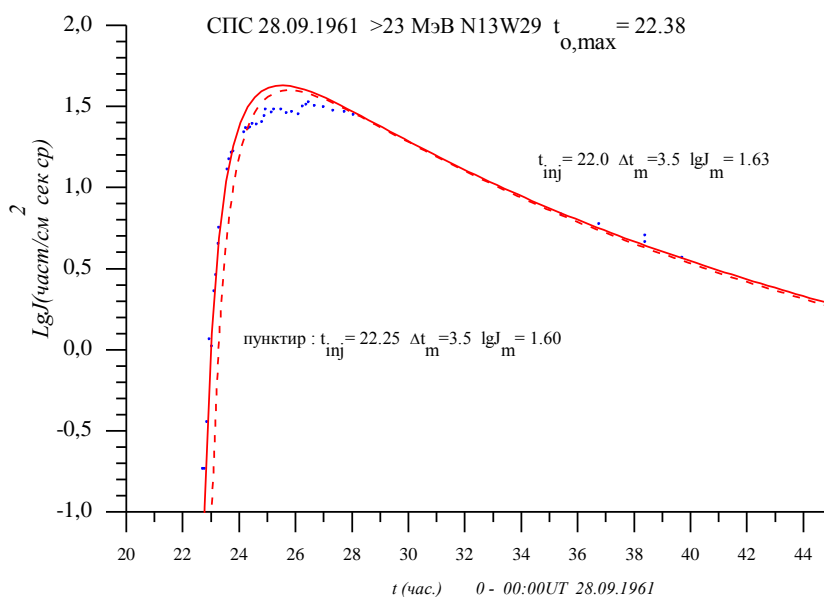


Рис. 29. Аппроксимация базисной зависимостью с моментом инжекции в 22.00 временного хода потока протонов со срезанной вершиной для интегрального энергетического канала с пороговой энергией 23 МэВ.

Пунктирная кривая – базисная зависимость для момента инжекции по оптической вспышке.

Другой важный класс возмущений базового временного профиля – это возмущения на фазе максимума.

Довольно часто при аппроксимации базовым временным профилем реального временного хода с пятиминутным временным усреднением оказывается срезанной вершина временного профиля.

Пример такой ситуации можно видеть на предыдущем рис. 28, из которого следует, что при хорошем совпадении профилей на фазе роста (до 4 порядков величины потока протонов) и на фазе спада до возмущения в момент $6t_m$ вблизи максимума имеются существенные отличия.

Аналогичная картина наблюдается для временного хода события 28.09.61 с энергией протонов больше 23 МэВ из работы [3], для которого было найдено значение $\beta=2/3$ (см. рис. 1а). Временной ход этого события хорошо аппроксимируется базисной зависимостью (сплошная кривая на рис. 29) с моментом инжекции в 22:00 UT (инжекция по максимуму оптического излучения в 22:15 UT, по максимуму жесткого рентгеновского излучения в 22:09 UT).

Такие возмущения базисного временного профиля могут быть достаточно хорошо объяснены длительной инжекцией ускоренных протонов в область свободного распространения.

Приведем вычисления временного профиля в случае стационарного профиля инжекции, профиля инжекции в виде линейного роста со временем и профиля инжекции в виде линейного спада во времени.

Профиль инжекции задается функцией $f(t)$ и нормирован на 1:

$$J(r, t) = J_m \int_0^t \left(\frac{t - t_i}{t_m}\right)^3 e^{3\left(1 - \frac{t-t_i}{t_m(E)}\right)} f(t_i) dt_i,$$

где

$$\int_0^\infty f(t_i) dt_i = 1$$

Получим следующие выражения для этих трех временных профилей инжекции:

1. Прямоугольный профиль инжекции

$$f(t_i) = \begin{cases} 1/T, & t_i \leq T \\ 0, & t_i > T \end{cases}$$

$$J(\tau) = \begin{cases} J_m \frac{1}{3k} \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{3}\right) e^{(3-\frac{3}{\tau})} \\ J_m \frac{1}{3k} e^{(3-\frac{3}{\tau})} \left(\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{3}\right) - \left(\frac{1}{\tau-k} + \frac{1}{3}\right) e^{\left(\frac{-3k}{(\tau-k)\tau}\right)} \right), \text{ где } \tau = t/t_m, k = T/t_m \end{cases}$$

2. Линейная зависимость профиля инжекции (рост в интервале времени $[0, T]$)

$$f(t_i) = \begin{cases} \frac{2}{T \left(1 - \frac{t_i}{T}\right)} & t_i \leq T \\ 0 & t_i > T \end{cases}$$

$$J(\tau) = \begin{cases} J_m \frac{2}{3k} e^{(3-\frac{3}{\tau})} \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{3} - \frac{\tau}{3k}\right) \\ J_m \frac{2}{3k} e^{(3-\frac{3}{\tau})} \left(\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{3} - \frac{\tau}{3k}\right) - \left(\frac{1}{3} - \frac{\tau}{3k}\right) e^{\left(\frac{-3k}{(\tau-k)\tau}\right)} \right) \end{cases}$$

3. Линейная зависимость профиля инжекции (спад в интервале времени [0, T])

$$f(t_i) = \begin{cases} \frac{2}{T \left(1 - \frac{t_i}{T}\right)} & t_i \leq T \\ 0 & t_i > T \end{cases}$$

$$J(\tau) = \begin{cases} J_m \frac{2}{3k} e^{\left(3 - \frac{3}{\tau}\right)} \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{3} - \frac{\tau}{3k}\right) & \tau \leq k \\ J_m \frac{2}{3k} e^{\left(3 - \frac{3}{\tau}\right)} \left(\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{3} - \frac{\tau}{3k}\right) - \left(\frac{1}{3} - \frac{\tau}{3k}\right) e^{\left(\frac{-3k}{(\tau-k)\tau}\right)}\right) & \tau \geq k \end{cases}$$

На рисунках 30-32 показаны построенные для этих трех случаев временные профили.

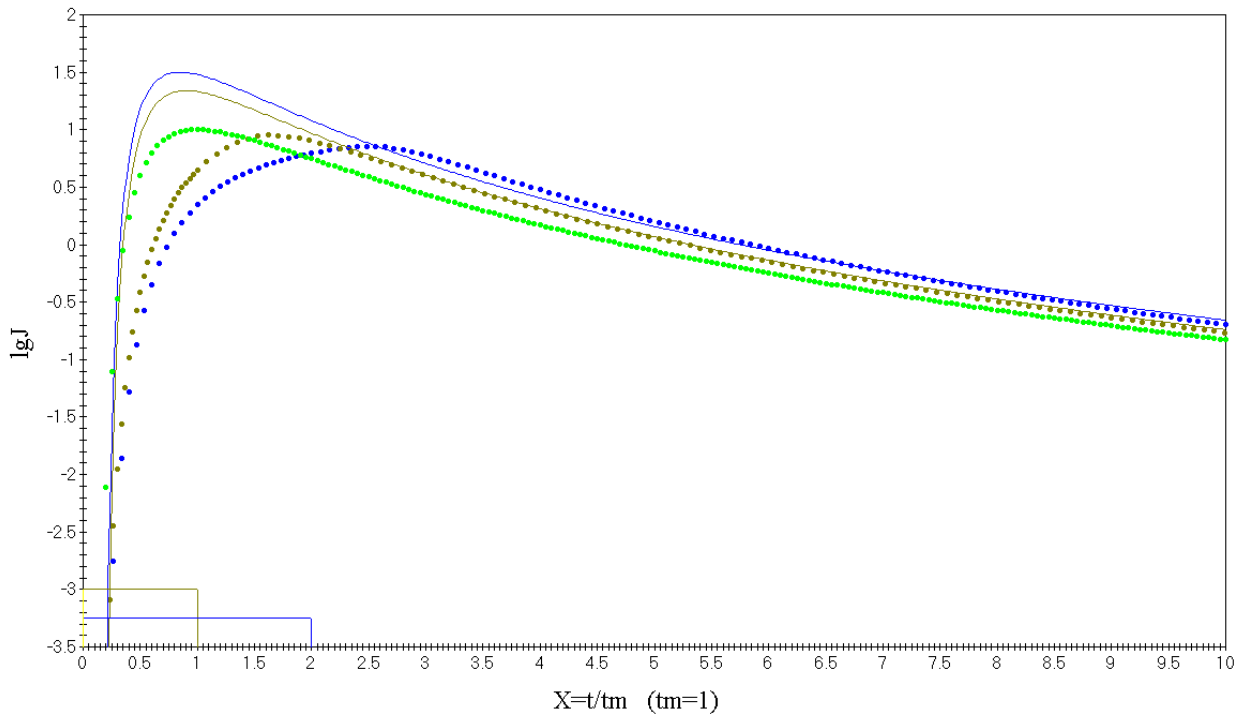


Рис. 30. Рассчитанный временной ход (точки) для случаев слева направо: мгновенная инжекция, прямоугольный профиль инжекции с длительностью равной t_m , прямоугольный профиль инжекции с длительностью равной 2. Сплошные кривые – аппроксимация базисной зависимостью. Слева внизу условно показаны профили инжекции.

Из рисунка следует, что базисная кривая хорошо описывает фазу роста и спада, но вершина профиля оказывается срезанной.

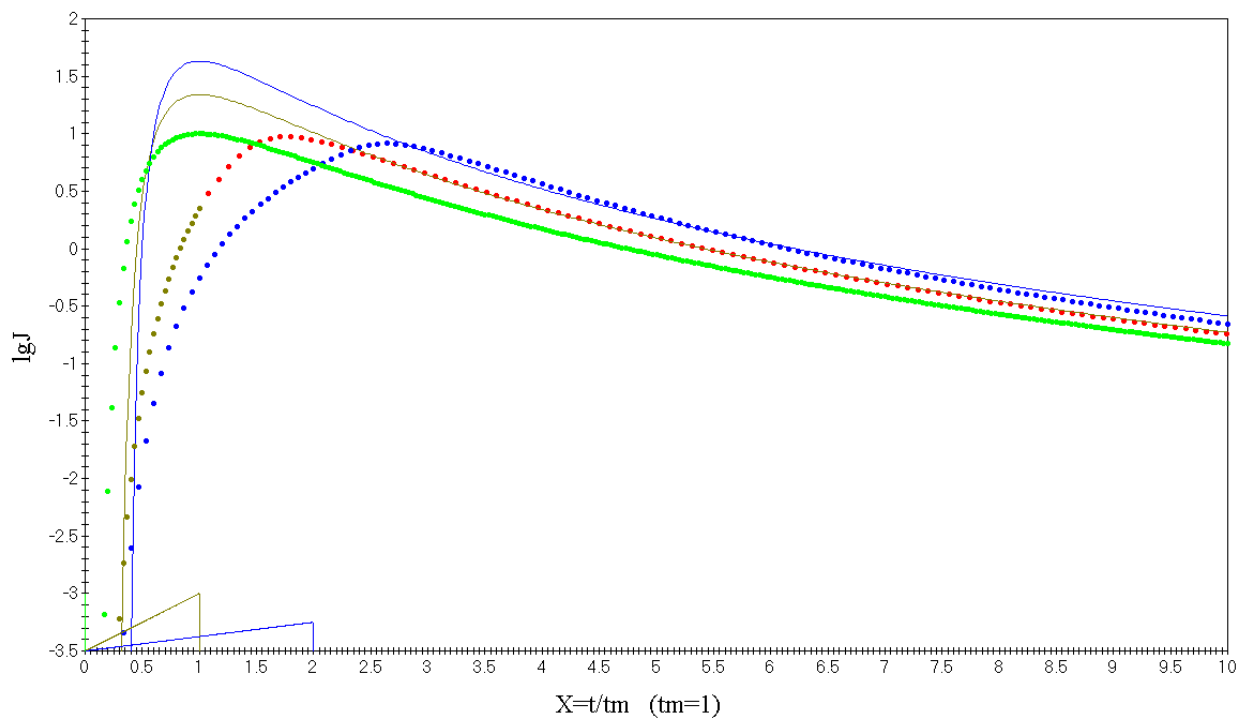


Рис. 31. Рассчитанный временной ход (точки) для случаев слева направо: мгновенная инъекция, треугольный профиль инъекции (рост) с длительностью равной t_m , и с длительностью равной $2t_m$. Сплошные кривые аппроксимация базисной зависимостью. Слева внизу условно показаны профили инъекции.

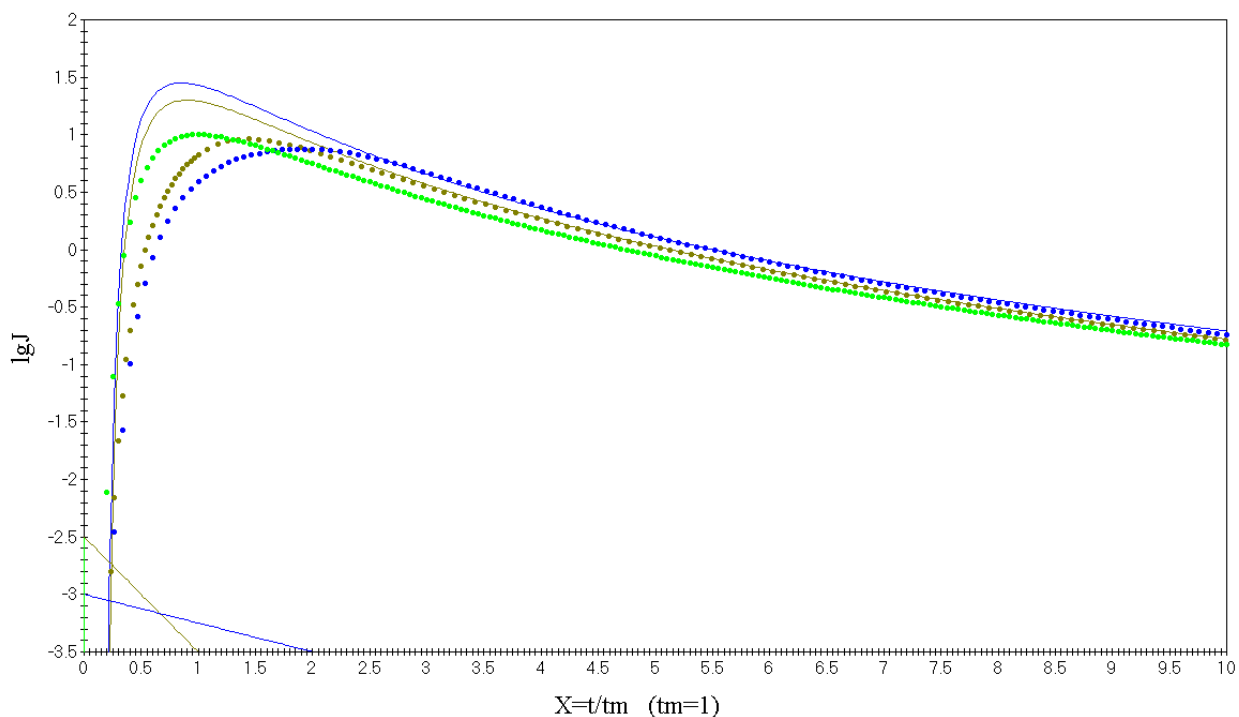


Рис. 32. Рассчитанный временной ход (точки) для случаев слева направо: мгновенная инъекция, треугольный профиль инъекции (спад) с длительностью равной t_m , и с длительностью равной $2t_m$. Сплошные кривые аппроксимация базисной зависимостью. Слева внизу условно показаны профили инъекции.

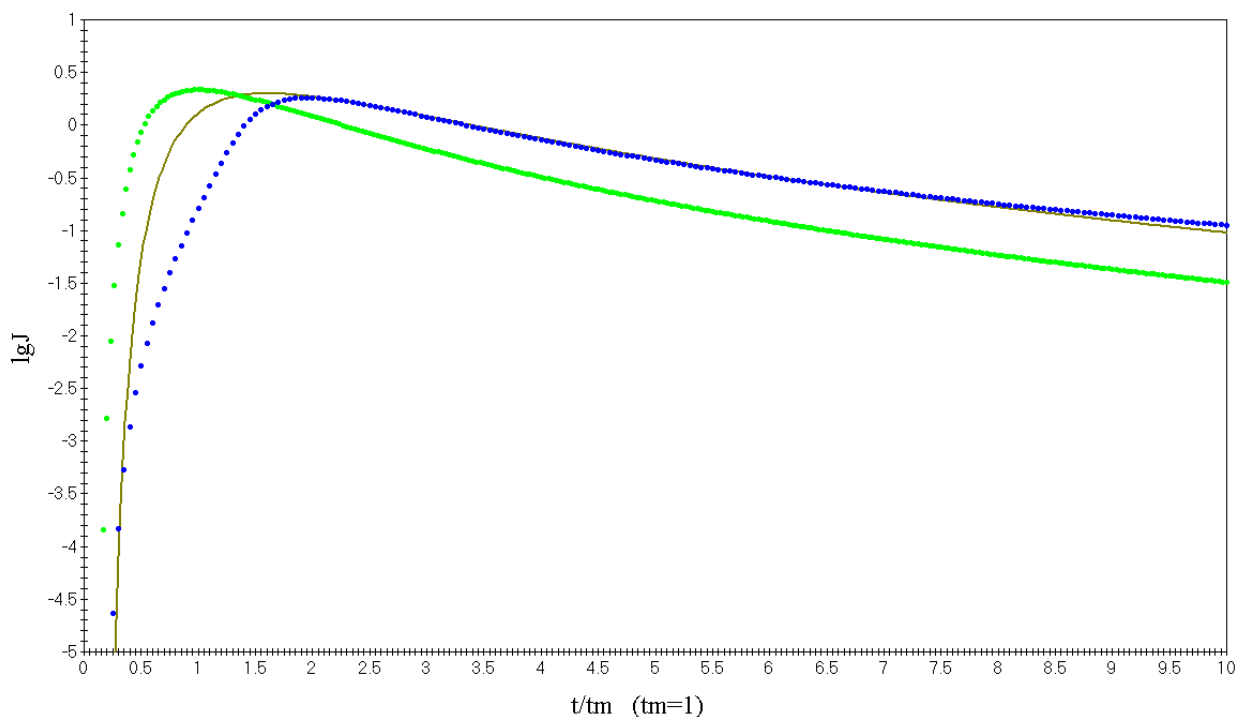


Рис. 33. Рассчитанный временной ход (точки) для случаев: мгновенная ижекция, и профиля ижекции в виде экспоненциального роста по закону: $f(t_{inj}) = 0.1 \cdot 10^{\frac{2t_{inj}}{t_m}}$ до момента времени $t = t_m$. Сплошная кривая аппроксимация базисной зависимостью.

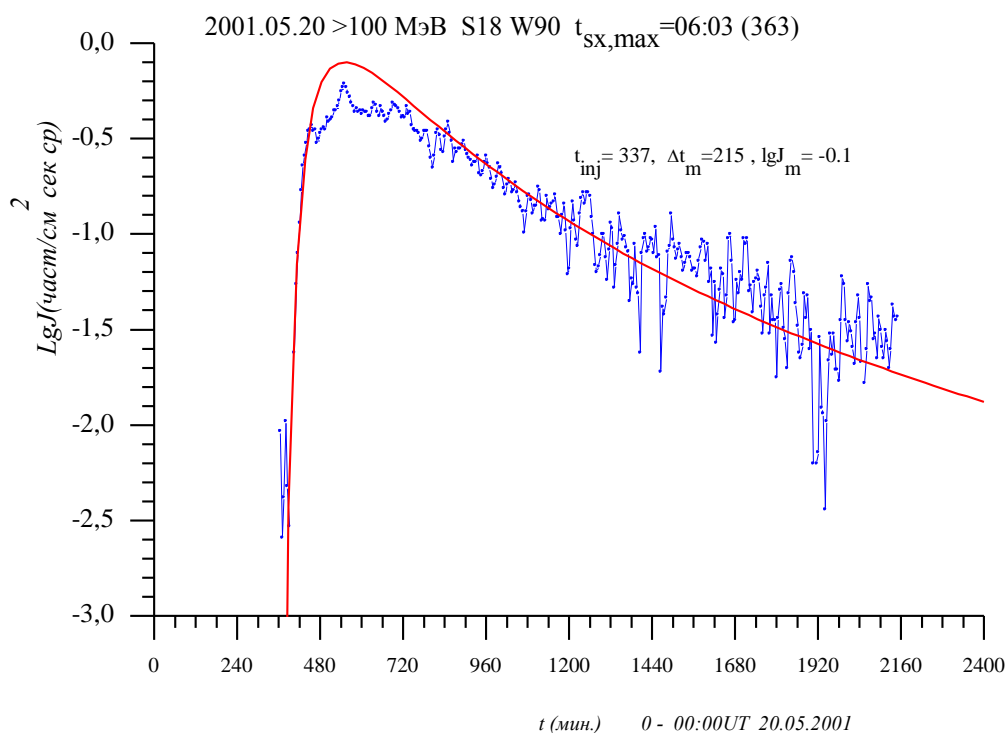


Рис. 34. Аппроксимация базисной кривой временного хода в событии 2001.05.20 с энергиями протонов больше 100 МэВ. Момент ижекции 337 мин.

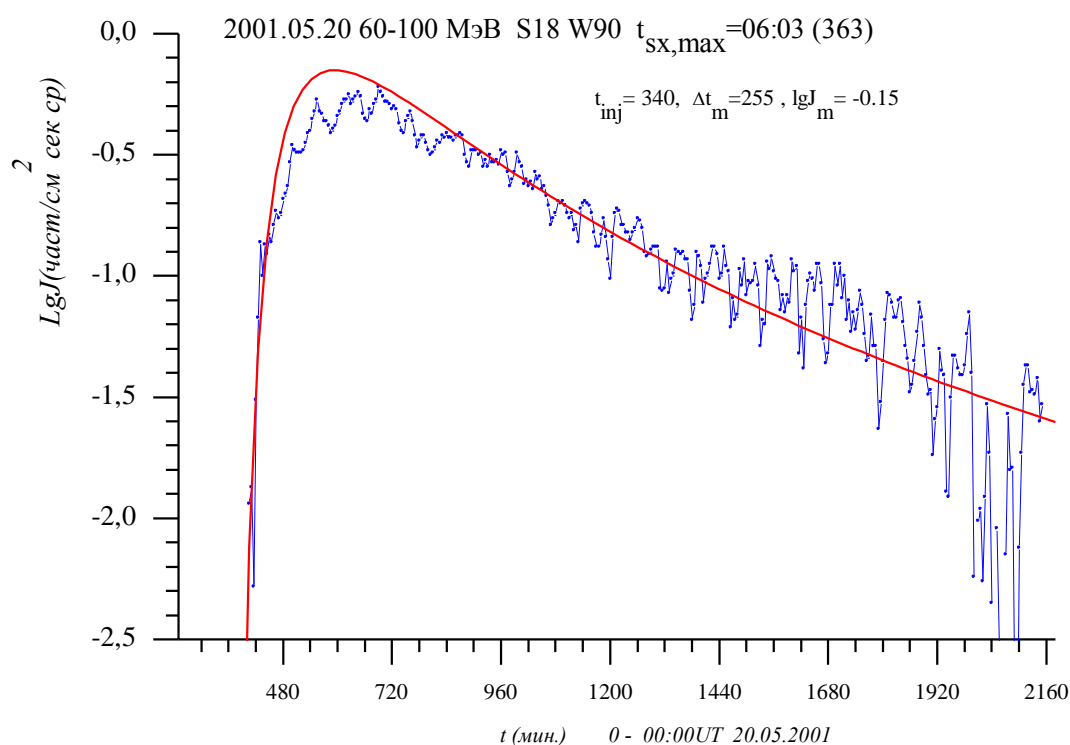


Рис. 35. Аппроксимация базисной кривой временного хода в событии 2001.05.20 с энергиями протонов 60-100 МэВ. Момент инжекции в 340 мин.

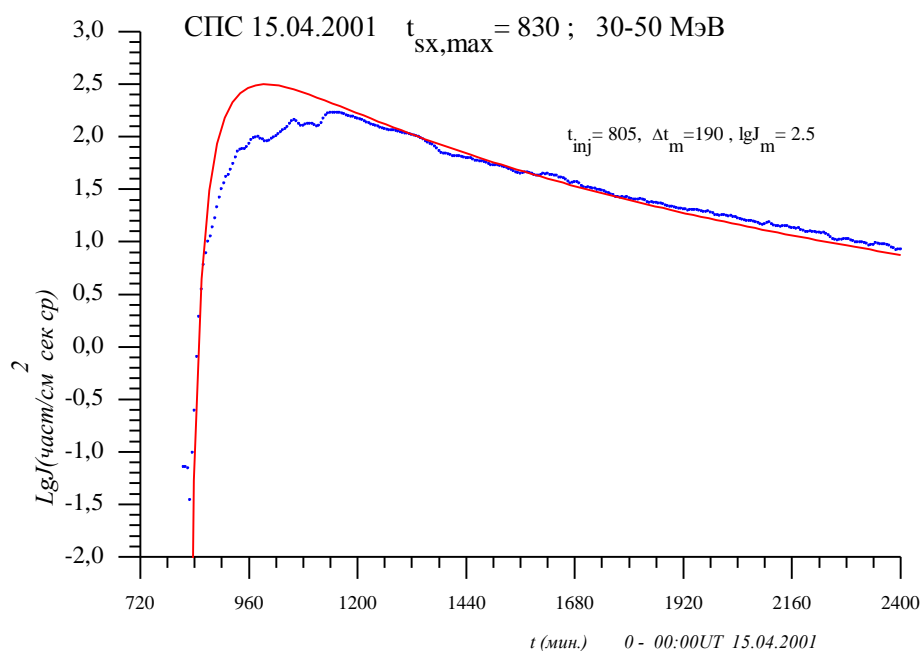


Рис. 36. Аппроксимация базисной кривой временного хода в событии 2001.04.15 с энергиями протонов 30-50 МэВ. Момент инжекции в 805 мин.

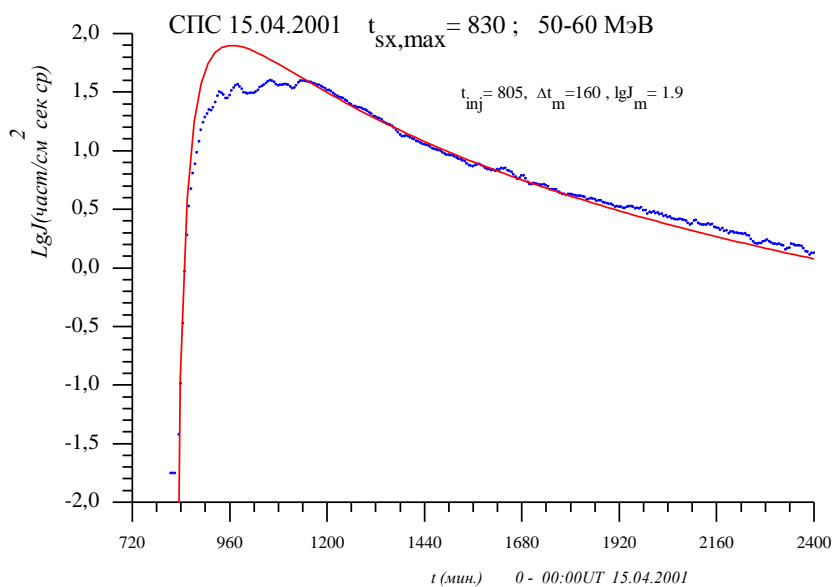


Рис. 37. Аппроксимация базисной кривой временного хода в событии 2001.04.15 с энергиями протонов 50-60 МэВ. Момент инжекции в 805 мин, совпадает с временем инжекции для протонов 30-50 МэВ

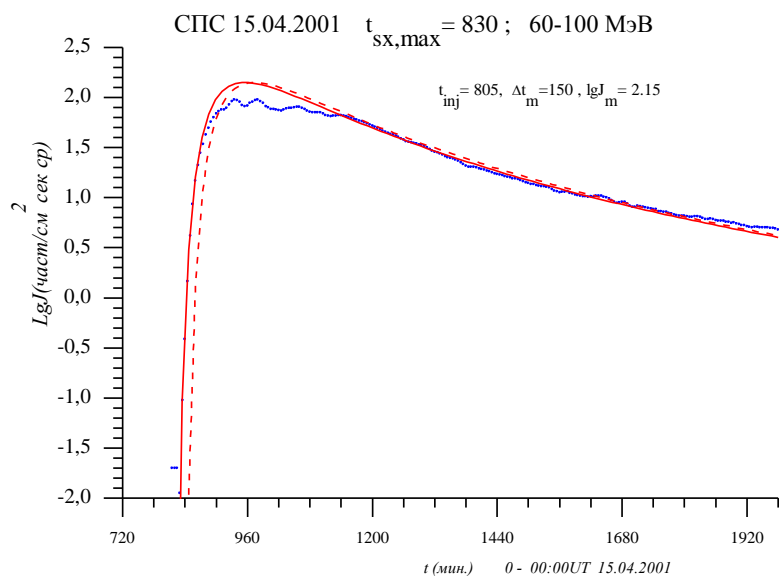


Рис. 38. Аппроксимация базисной кривой временного хода в событии 2001.04.15 с энергиями протонов 60-100 МэВ. Момент инжекции в 805 мин, совпадает с временем инжекции для протонов 30-50 МэВ и 50-60 МэВ. Пунктир – кривая для момента инжекции в момент максимума рентгеновского всплеска (830 мин).

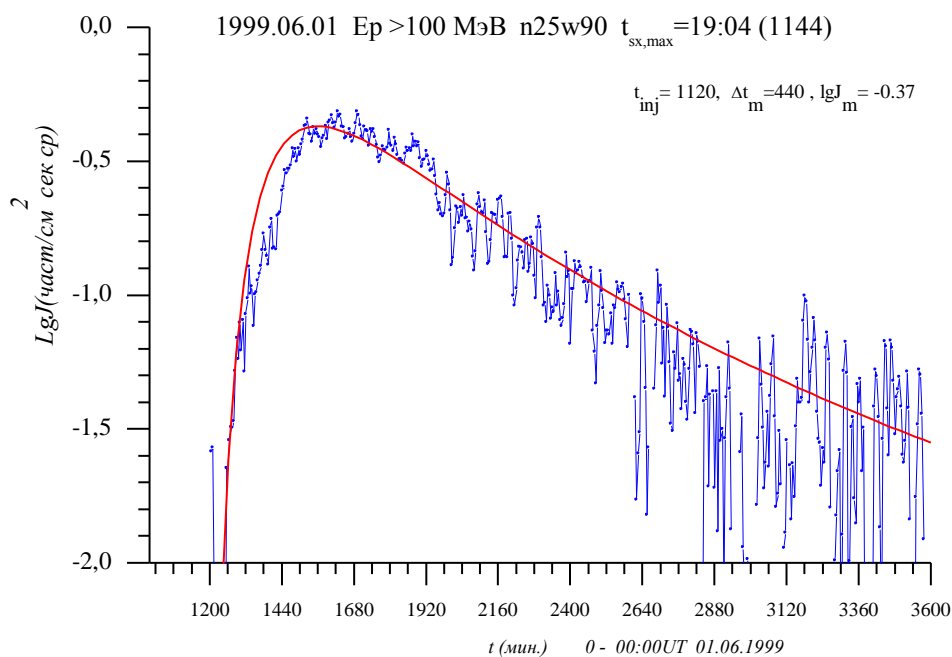


Рис. 39. Аппроксимация базисной кривой временного хода в событии 1999.06.01 с энергиями протонов больше 100 МэВ. Момент инжекции в 11 час. 20 мин.

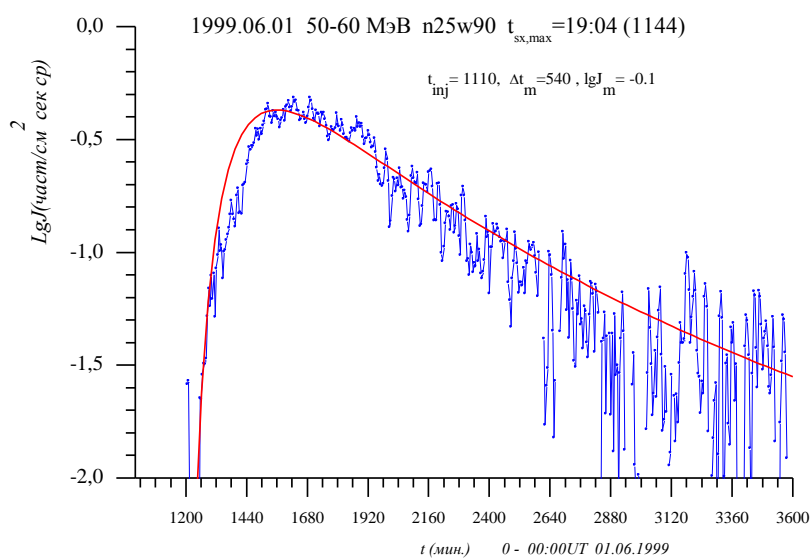


Рис. 40. Аппроксимация базисной кривой временного хода в событии 1999.06.01 с энергиями протонов (50-60) МэВ. Момент инжекции в 11 час. 10 мин.

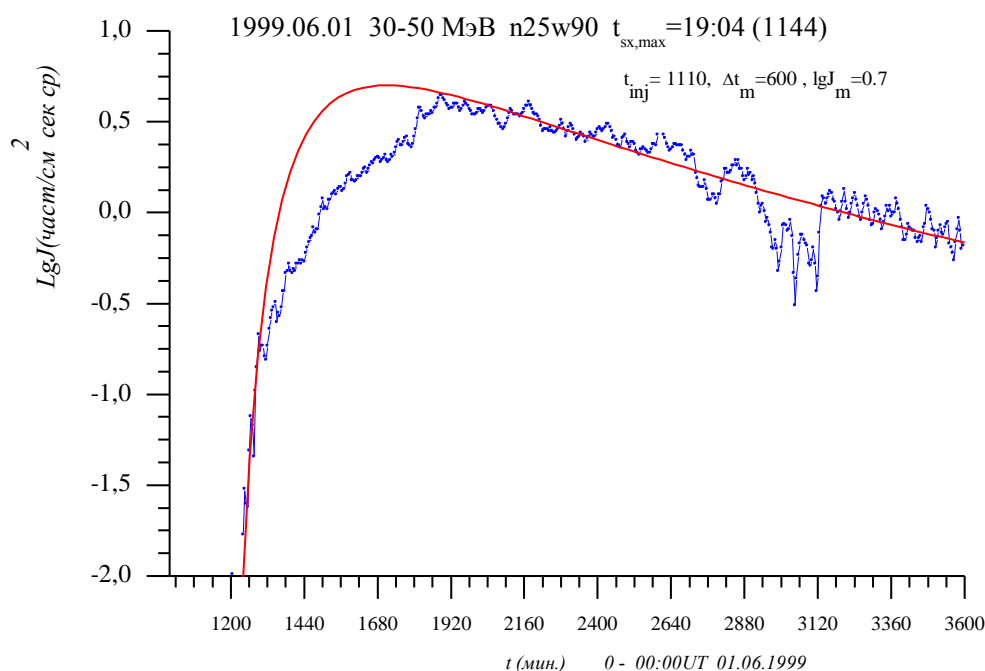


Рис. 41. Аппроксимация базисной кривой временного хода в событии 1999.06.01 с энергиями протонов (30-50) МэВ. Момент инжекции в 11 час. 10 мин., совпадает с временем инжекции для протонов и 50- 60 МэВ.

Как видно из рисунков 34–41 базисная зависимость достаточно хорошо описывает временной ход и в случае длительной инжекции. Моменты инжекции протонов разных энергий для одного события совпадают с точностью до 5 мин. При этом искажения наступают в области максимума временного хода в соответствии с проведенными расчетами (см. рисунки 29-33).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что для большого числа СПС реализуется временной профиль развития, который обладает масштабным подобием. Такой временной профиль может быть назван основным или базисным, он соответствует линейной зависимости коэффициента диффузии от расстояния.
2. Наблюдаемое разнообразие временных профилей может быть связано с возмущениями базисного временного профиля, которые обусловлены различными причинами. Показано, что искажения базисного временного на фазе максимума в виде срезанной вершины профиля могут быть хорошо объяснены длительной инжекцией протонов в область свободного распространения.
3. Показано, что использование данных по потокам протонов для интегральных энергетических каналов приводит к ошибочным результатам в описании временного хода на фазе роста СПС с помощью базисной функции. В частности возникают значительные ошибки в определении момента инжекции частиц (до 3/4 часа). Это связано с зависимостью времени достижения максимума в событиях СПС от энергии протонов (дисперсия по энергии временного хода). Для тех же самых событий временной ход протонов для дифференциальных каналов хорошо описывается базисной зависимостью, с одинаковым временем инжекции для протонов различных энергий.
4. Показано, что существование базисного временного профиля временного развития потоков протонов от вспышек позволяет определять момент инжекции непосредственно по временному профилю частиц с точностью 5-10 мин, что в ряде случаев позволит ответить на вопрос о том, где ускоряются протоны (в ударных волнах корональных транзиентов или в солнечных вспышках).

ЛИТЕРАТУРА

1. Очелков Ю.П. Скейлинг временного развития всплесков мягкого рентгеновского излучения Солнца на фазе роста. Гелиогеофизические исследования, 2016 год, вып.15. стр. 1-31
<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=461>
2. Паркер Е.Н. Динамические процессы в межпланетной среде, «Мир», 1965.
3. Krimigis S.M. Interplanetary diffusion model for the time behavior of intensity in a solar cosmic ray event JGR, 1965,70,2943-2960
4. Burlaga L.F. Anisotropic diffusions of solar cosmic rays, JGR, 1967, 72, 4449-4465
5. Lupton J.R., Stone E.C. Solar flare particle propagation of a new analytic solution with space-craft measurements. JGR, 1973, 78, 1007-1018
6. Дорман Л.И., Мирошниченко Л.И. Солнечные космические лучи 1968. Москва, «Наука».
7. Беловский М.Н., Очелков Ю.П. О связи между параметрами протонных событий. Солнечные данные, 1978 №2, 89.
8. Беловский М.Н., Очелков Ю.П. Прогноз интегральных параметров событий СКЛ по начальным характеристикам явлений. Геомагнетизм и аэрномия. 1981. Т.21. №5. С.792-797.

THE SCALING IN TIME EVOLUTION OF SOLAR PROTON EVENTS

Yu. P. Ochelkov

For research of time evolution of solar proton events (SPE) the method of scaling is utilized. It is shown that for the great number of SPE's the time profile is realized which has the property of scaling. Such time profile can be called the main or basic profile. The analytical expression found for basic profile, that fits to diffusion with diffusion coefficient, which has linear dependence on the distance to the Sun. The paper considers the perturbations of the time profiles associated with long-term injection of solar protons, what leads to the cut off tops of the profile, and perturbations, which results in the use of integral energy channel to study the profiles. It is shown that for events with basic time profile it is possible to determine with good accuracy the time of proton injection (if the data with five-minute averaging is used).

KEYWORDS: SOLAR PROTON EVENT, TIME PROFILE, SCALING, TIME OF INJECTION