

БОРТОВАЯ КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРОВ ПРОТОНОВ КА «ЭЛЕКТРО-Л» ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПРОТОНОВ С КА «GOES»

А.С. Аракелов, В.А. Буров, Ю.П. Очелков

On-board calibration of the spacecraft 'Elektro-L' proton detectors was conducted and it was simultaneous with the spacecraft 'GOES' flux changes in solar proton events. The values of the scaling factors from impulse per second to flux unities particle/sec cm² sr for the spacecraft detectors of 'Elektro-L' were obtained, which recorded protons in the energy channels 13.5- 23 meV ,23-24 meV .The estimate of proton flux background was carried out. It is concluded that the three SPE detectors on-board 'Elektro-L' give us an opportunity to estimate proton fluxes of more than 10 meV SPE correctly, which are more than 2-3 particle/sec cm² sr.

Key words: solar proton events, geostationary spacecraft, on-board calibration.

Проведена бортовая калибровка детекторов протонов КА «Электро-Л» по одновременным с КА «GOES» измерениям потоков протонов в солнечных протонных событиях. Получены значения коэффициентов пересчета от импульсов в секунду, к единицам потока в част/см²срр для детекторов КА «Электро-Л» регистрирующих протоны в энергетических каналах 13.5-23 МэВ, 23-42 МэВ. Проведена оценка фоновых значений потоков протонов. Делается вывод о том, что три детектора блока СКЛ КА «Электро-Л», дают возможность правильно определять потоки протонов больше, чем 2-3 част/см²срр в солнечных протонных событиях с энергиями протонов больше 10 МэВ.

Ключевые слова: солнечные протонные события, геостационарные космические аппараты, бортовая калибровка.

Введение

Имеющийся в составе гелиогеофизического комплекса геостационарного КА «Электро-Л» блок СКЛ, предназначенный для измерения плотности потока энергичных частиц, в силу ряда причин не прошел надлежащую наземную процедуру калибровки. Отсутствие надежных сведений о пороговых уровнях регистрируемых потоков и эффективных площадях для различных энергий существенно осложняет возможности интерпретации данных и, как следствие, мониторинг космической погоды.

Для «бортовой» калибровки можно использовать данные измерений другого детектора, принимаемого за эталон. Например, измерения на геостационарном КА «GOES».

**Аракелов Артем Сергеевич, ФГБУ «ИПГ», ведущий инженер программист,
т.(499)181-44-88, e-mail: arakelov@ipg.geospace.ru**

**Буров Вячеслав Анатолиевич, ФГБУ «ИПГ», зав. отделом,
т.(499)181-39-42, e-mail: globur2000@yahoo.com**

**Очелков Юрий Павлович, ФГБУ «ИПГ», старший научный сотрудник,
т.(499)181-39-42, e-mail: yur_och@mail.ru**

При сравнении данных с различных космических аппаратов с целью калибровки детекторов протонов наиболее целесообразно использовать данные наблюдений во время солнечных протонных событий (СПС).

При этом следует учитывать следующие обстоятельства:

- возможное отличие измеряемой величины потоков протонов, связанное с различным положением КА в космическом пространстве [1];
- различие величин фоновых потоков протонов в отсутствие потоков от СПС (то есть уровень шума);
- влияние анизотропии потоков на показания детекторов различных КА;
- различное временное усреднение, используемое для получения данных;

Требования к данным

При формировании анализируемых данных следует исключить интервал фазы роста потока протонов в событии, так как в это время наблюдаются анизотропные потоки протонов. Кроме этого, целесообразно исключить и периоды возмущений потоков во время магнитных бурь, так как в это время возможна зависимость показаний от местонахождения КА (так при сравнении потоков с КА «GOES» и КА «МЕТЕОР» обнаруживается значительное отклонение отношения потоков от среднего значения во время возмущений потоков, связанных с ударными волнами) [2]. Следует использовать СПС с дисперсией по энергии, то есть зависимостью временного развития события от энергии протонов. Такая зависимость связана в первую очередь с зависимостью коэффициента диффузии протонов в межпланетном пространстве от энергии протонов. Сравнение временных ходов для событий с дисперсией позволяет уточнить энергетические пороги детекторов и определить наличие зависимости величины энергетических порогов от показателя спектра протонов.

Таким образом процедура «бортовой калибровки» требует учета многих факторов. В принципе можно считать, что оба КА «GOES» и «Электро-Л» наблюдают потоки протонов в открытом космическом пространстве, то есть значения потоков в СПС, относящиеся к изотропной стадии и в отсутствие возмущений, должны быть одинаковы.

Анализ результатов

Иллюстрацией к вопросу о достаточности статистики для потоков, регистрируемых датчиком КА «Электро-Л», может быть рис. 1, на котором показаны результаты измерений плотности потока протонов в одном и том же промежутке времени (около 6 минут), в течение которого величина потока практически не изменялась.

При периодах усреднений 5-10-30 секунд разброс значений очень велик, но при увеличении периода усреднения разброс уменьшается и для значений более 200 секунд становится незначительным.

Таким образом, для датчиков КА «Электро-Л» существует минимальное время усреднения данных, что связано с малой площадью используемых детекторов. По нашим оценкам минимальное время усреднения превышает 100 секунд. При калибровке для потоков, измеряемых на КА «Электро-Л» мы использовали усреднение данных по времени аналогичное усреднению, используемому для данных с КА «GOES»: пятиминутное усреднение. Средний за 5 минут поток относился в обоих случаях к середине временного интервала усреднения.

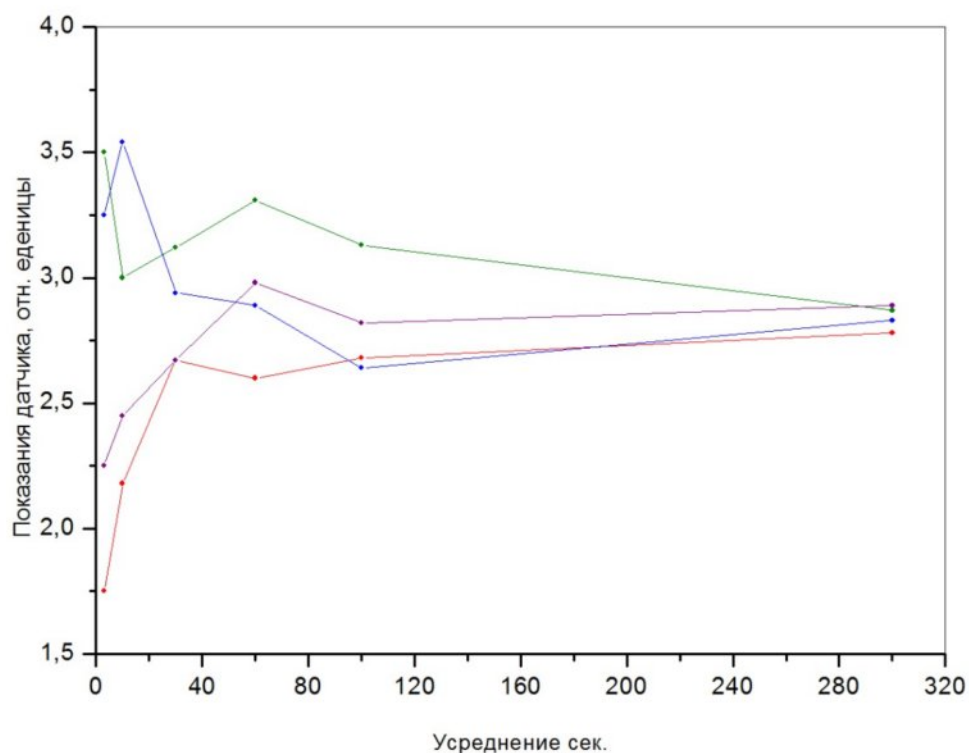


Рис. 1 – Зависимость результатов измерений плотности потока протонов с энергиями 13.5-23 МэВ на КА «Электро-Л» для фиксированного интервала времени (с 18.00 UT по 18.16 UT 29 января 2012 г.) от периода усреднения.

Измерения потоков энергичных частиц на КА «GOES» осуществляются (так же как и на КА «Электро-Л») в различных энергетических интервалах. Затем данные пересчитываются в интегральные спектры для ряда фиксированных порогов по энергиям и приводятся в виде таблиц и графиков. Сама процедура пересчета нам не известна, а пороговые значения датчиков КА «Электро-Л» отличаются от пороговых значений КА «GOES», поэтому в дальнейшем мы будем использовать только пересчитанные интегральные значения в предположении о степенном характере мгновенных энергетических спектров потоков протонов на различных участках энергетического спектра.

В нашем случае перерасчет целесообразно сделать для пороговых энергий потоков протонов соответствующих пороговым значениям для КА GOES: 10 МэВ, 30 МэВ, 50 МэВ. Детекторы КА «Электро-Л» регистрируют потоки протонов в трех энергетических каналах: 13.5-23 МэВ, 23-42 МэВ, 42-112 МэВ (эти пороговые значения требуют уточнения). Будем считать, что складывая показания всех трех детекторов мы получим значение потока протонов в интегральном канале с порогом 13.5 МэВ, складывая показания второго и третьего детектора мы получим значение потока протонов в интегральном канале с порогом 23 МэВ, показания третьего детектора мы будем принимать за значения потока протонов в интегральном канале с порогом 42 МэВ. При этом мы предполагаем, что значение плотности потока протонов с энергией больше 100 МэВ пренебрежимо мало по сравнению со значениями потоков регистрируемыми датчиками КА «Электро-Л». Это оправдано в случае, если потоки протонов значительно (на порядок величины) превышают фоновые значения потоков, и в случае, если потоки регистрируются не на начальной фазе возрастаний потоков протонов в СПС.

Введем следующие обозначения: $I(>E)$ интегральный по энергии поток протонов с энергиями больше или равными E , γ - показатель интегрального спектра протонов. Тогда

на участке со степенным спектром (который, как мы предполагаем, реализуется для небольших участков спектра) потоки протонов для разных пороговых энергия E_1 и E_2 связаны соотношением:

$$I(> E_2) = I(> E_1) \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^{-\gamma} \quad (1)$$

Используя эту формулу, можно получить формулу для расчета потока протонов с пороговой энергией E_3 по заданным значениям потоков протонов с пороговыми энергиями E_1 и E_2 (в предположении, что все три значения энергии относятся к участку степенного спектра с одинаковым показателем степени):

$$I(> E_3) = I(> E_1) \left(\frac{E_3}{E_1} \right)^{-\frac{\lg \left(\frac{I(>E_1)}{I(>E_2)} \right)}{\lg \frac{E_2}{E_1}}} \quad (2)$$

Приведем формулы для перерасчета интегральных потоков с пороговыми энергиями 13.5, 23 и 42 МэВ для КА «Электро-Л» к потокам с пороговыми энергиями 10, 30, 50 МэВ:

$$LgI(> 10) = LgI(> 13.5) + 0.563 * (LgI(> 13.5) - LgI(> 23));$$

где $E_2=23$ МэВ, $E_1= 13,5$ МэВ

$$LgI(> 30) = LgI(> 23) - 0.439 * (LgI(> 23) - LgI(> 42));$$

где $E_2=42$ МэВ, $E_1= 23$ МэВ

$$LgI(> 50) = LgI(> 42) - 0.290 * (LgI(> 23) - LgI(> 42)); \quad (3)$$

где $E_2=42$ МэВ, $E_1= 23$ МэВ

Значения пересчитанных потоков измеренных на КА «Электро-Л» с энергиями 10 и 30 МэВ сравнивались с соответствующими потоками с КА «GOES». Для анализа использовались данные по 4 событиям в 2012г.

На рис. 2 представлена зависимость $Lg I_{\text{Electro}}(>10\text{MeV})$ от $Lg I_{\text{Goes13}}(>10\text{MeV})$, а на рис. 3 зависимость $Lg I_{\text{Electro}}(>30\text{MeV})$ от $Lg I_{\text{Goes13}}(>30\text{MeV})$, где поток для КА «GOES» измеряется в част/см²ср, а для «Электро-Л» в импульсах в секунду.

В случае линейной зависимости скорости счета детекторов КА «Электро-Л» от величины потока протонов, зависимости должны быть линейными с углом наклона к осям координат прямой, описывающей зависимость, равным 45⁰ (как следует из рисунков такое допущение является оправданным). В случае отсутствия линейной зависимости графики временных ходов СПС, построенные по данным с различных КА, будут отличаться друг от друга растяжением – сжатием вдоль оси интенсивностей. Как мы увидим в дальнейшем из сравнения графиков временных ходов СПС, построенных по данным КА «Электро-Л» и КА «GOES», такой эффект отсутствует.

Для определения коэффициента пересчета от показаний в имп/с к показаниям в единицах потока част/см²с ср для КА «Электро-Л» построена линейная зависимость (с углом наклона прямой 45⁰), соответствующая минимуму дисперсии (для точек, соответствующих измерениям потоков СПС за исключением фазы роста потоков, малых значений потоков < 2 част/см²ср (для 10 МэВ), периодов возмущения потоков во время магнитных бурь). Значения коэффициента пересчета определяются формулой:

$$LgK = < Lg I_{\text{Electro}}(>E) > - < Lg I_{\text{Goes13}}(>E) > \quad (4)$$

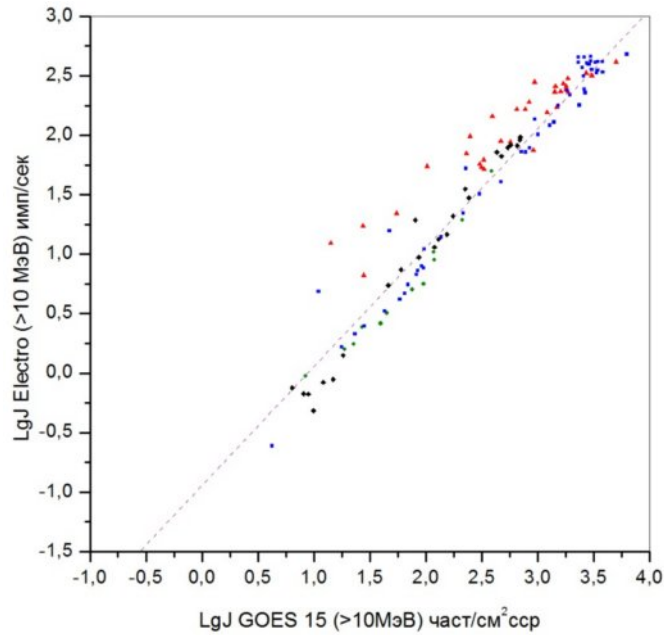


Рис. 2 – Значения потока протонов с энергией больше 10 МэВ по данным КА «Электро-Л» (ось Y) и КА «GOES» (ось X). Красные точки – значения потоков для события 6–11 марта 2012 г., зеленые - для события 13–15 марта 2012 г., синие - для события 23-26 января 2012 г., черные – для события 27–29 января 2012 г. Прямая пунктирная линия – линейная зависимость для значений потоков при условии минимума дисперсии по оси Y (для логарифмов потоков, без учета значений для фазы роста СПС)

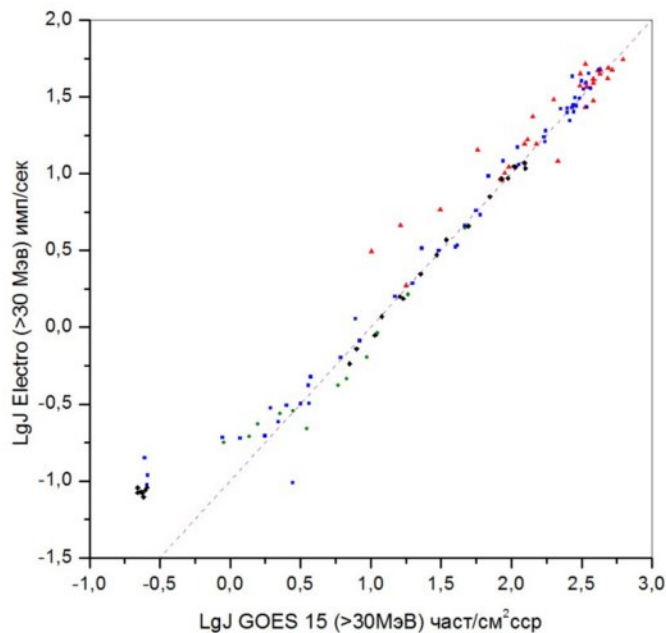


Рис. 3 – Значения потока протонов с энергией больше 30 МэВ по данным КА «Электро-Л» (ось Y) и КА «GOES» (ось X). Красные точки - значения потоков для события 6-11 марта 2012 г., зеленые - для события 13-15 марта 2012 г., синие - для события 23-26 января 2012 г., черные - для события 27-29 января 2012 г. Прямая пунктирная линия - линейная зависимость для значений потоков при условии минимума дисперсии по оси Y (для логарифмов потоков, без учета значений для фазы роста СПС)

Здесь скобки означают усреднение по данным наблюдения потоков. Прямые пунктирные линии на рис.2-3 соответствуют рассчитанным коэффициентам K .
 Рассчитанные значения коэффициентов пересчета для 10 МэВ и для 30 МэВ приблизительно одинаковы и равны 9 и 10, соответственно. Примерное равенство коэффициентов оправдывает применимость формул (3), при выводе которых в неявном виде было сделано такое допущение. В этом случае мгновенные энергетические спектры протонов для обоих космических аппаратов должны примерно совпадать друг с другом. На рис. 4-5 приведены мгновенные спектры потоков протонов.

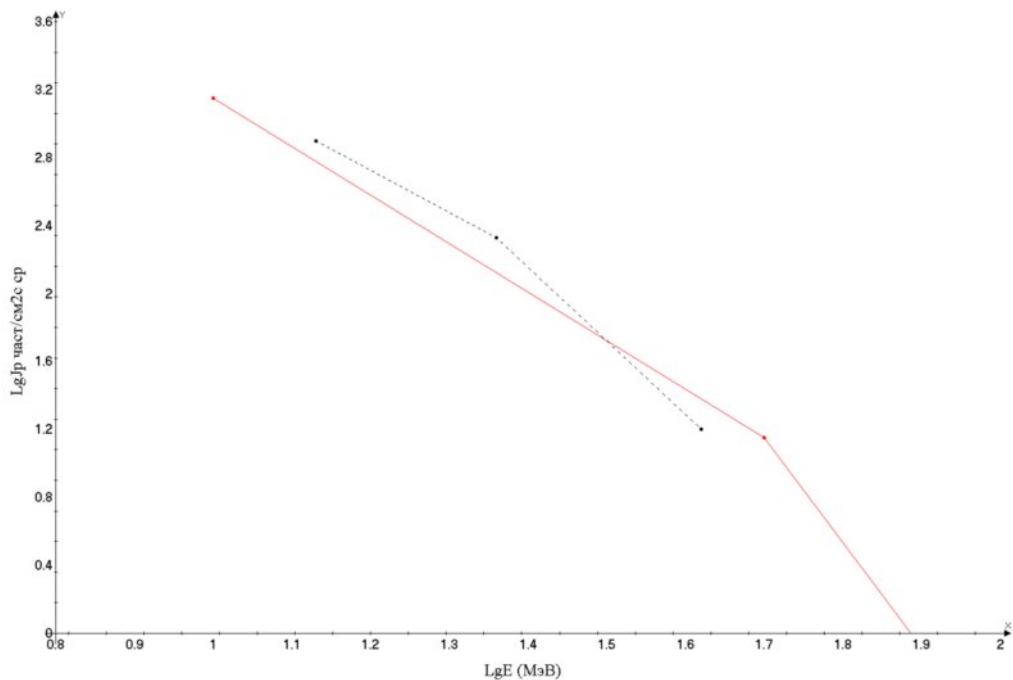


Рис. 4 – Спектр потоков протонов 24.01.2012 в 07UT по данным КА «Электро-Л» (черный цвет) и КА «GOES» (красный цвет)

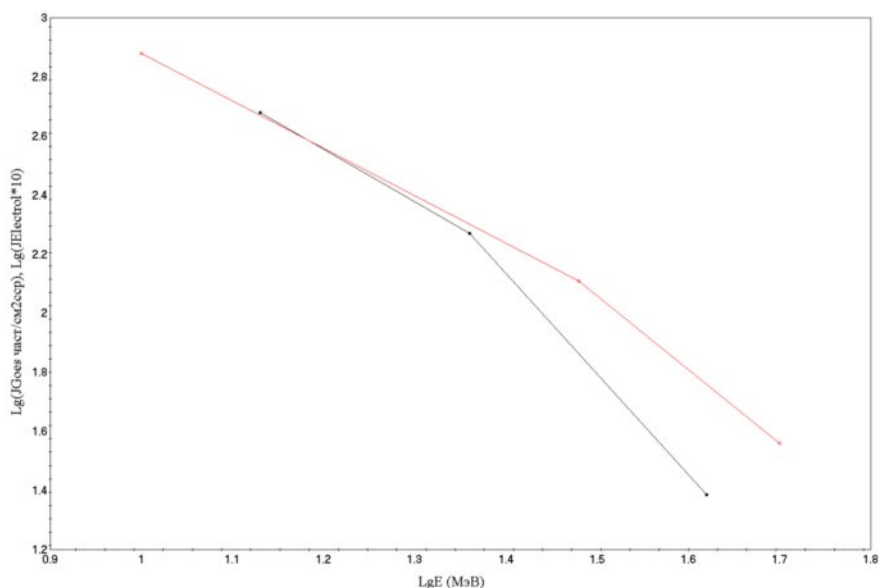


Рис. 5 – Спектр потоков протонов 28.01.2012 в 02UT по данным КА «Электро-Л» (черный цвет) и КА «GOES» (красный цвет)

Для уточнения значений пороговых энергий детекторов для разных КА следует сравнивать временные ходы СПС, построенные по различным данным. Если временные ходы растянуты или сжаты вдоль оси энергии по сравнению с временным ходом, который считается эталонным, то следует изменить значения пороговых энергий.

На рис. 6-9 приведены временные ходы потоков протонов с энергией >10 МэВ с учетом полученных значений коэффициентов пересчета для КА «Электро-Л» для 4 событий СПС 2012 г.

Как следует из рисунков, эффект сжатия-растяжения временных ходов отсутствует. Определив по данным наблюдения потоков в событиях СПС коэффициенты пересчета детекторов КА «Электро-Л» от импульсов в сек к $\text{част}/\text{см}^2\text{ср}$, сравним показания детекторов КА «GOES 15» и КА «Электро-Л» в отсутствие потоков протонов от вспышек (фоновые значения потоков). В этом случае формулы (3) не применимы, и мы будем сравнивать значения потоков для энергий больше 10 МэВ (для КА «GOES 15») и для интервала 13.5-112 МэВ (для КА «Электро-Л»). На рис.10 приведены показания детекторов двух космических аппаратов в $\text{част}/\text{см}^2\text{ср}$ для 10 и 11 апреля 2012 года. Как следует из рисунка, потоки по данным КА «Электро-Л» равны в среднем 1-1.2 $\text{част}/\text{см}^2\text{ср}$, что на порядок превышает реально наблюдаемые фоновые значения 10^{-2} - 10^{-1} $\text{част}/\text{см}^2\text{ср}$ (по данным КА «GOES»). Отсюда можно сделать вывод о том, что наблюдаемые значения фона связаны с шумами детектирующих устройств КА «Электро-Л».

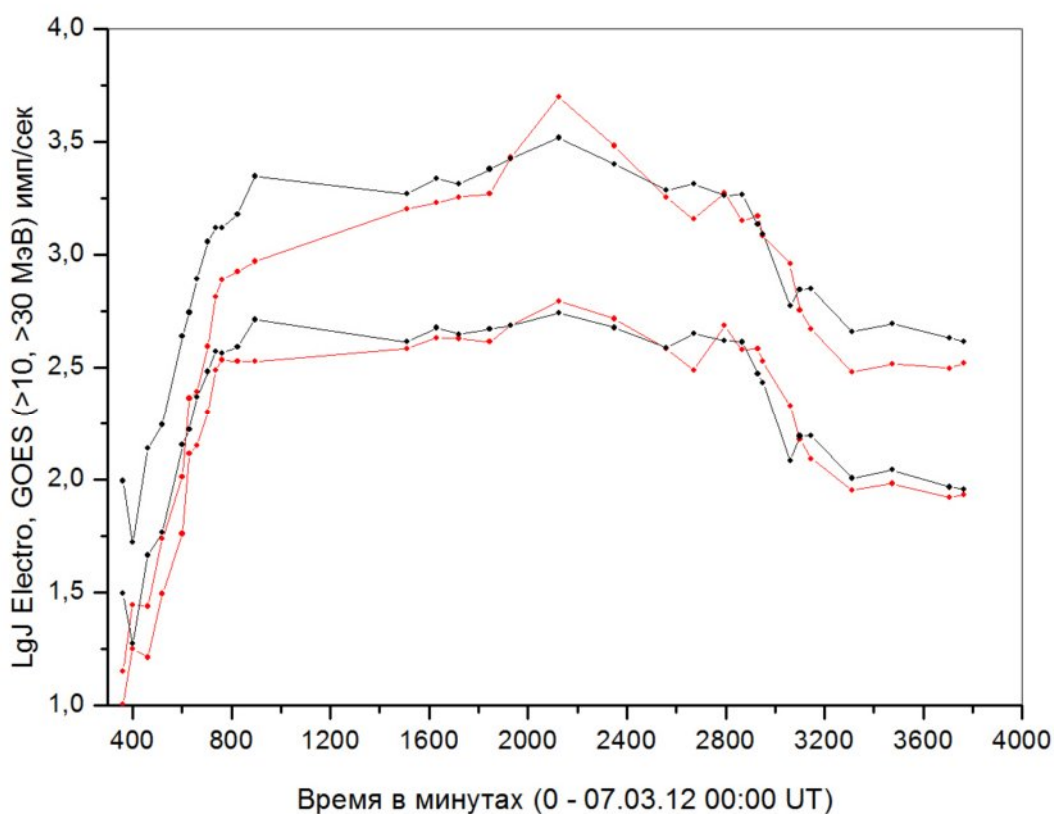


Рис. 6 – Временные ходы потоков протонов с энергией >10 МэВ (верхние кривые) и >30 МэВ (нижние кривые) по данным КА «GOES 15» (красный цвет) и «Электро-Л» (черный цвет) для СПС 7.03.2012 г.

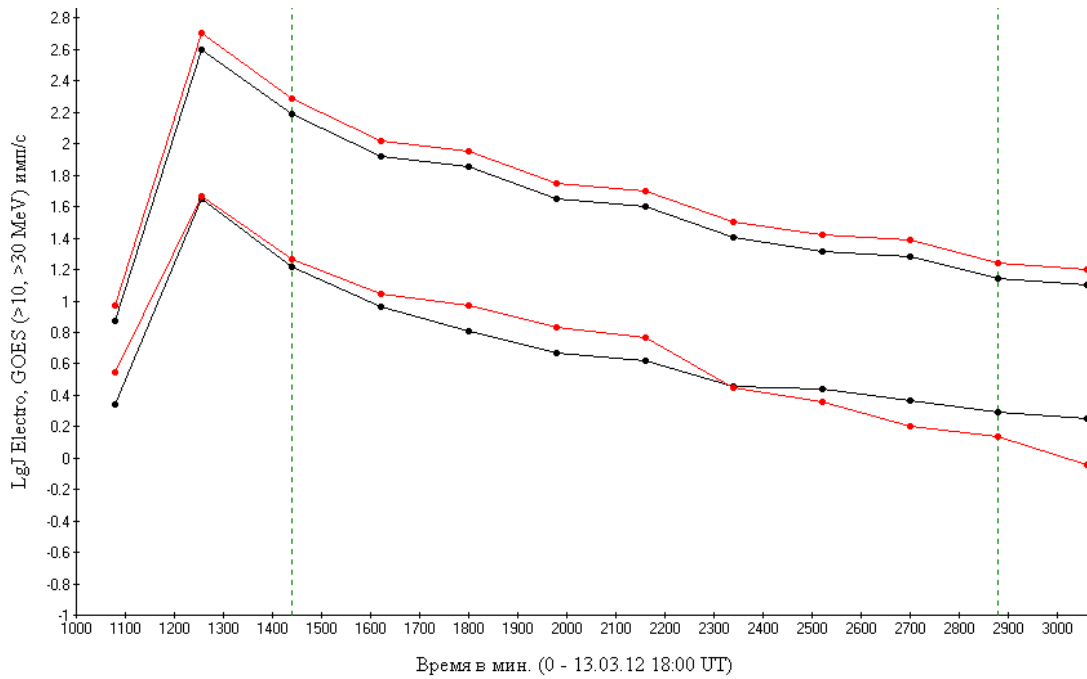


Рис. 7 – Временные ходы потоков протонов с энергией >10 МэВ (верхние кривые) и >30 МэВ (нижние кривые) по данным КА «GOES 15» (красный цвет) и «Электро-Л» (черный цвет) для СПС 13.03.2012 г.

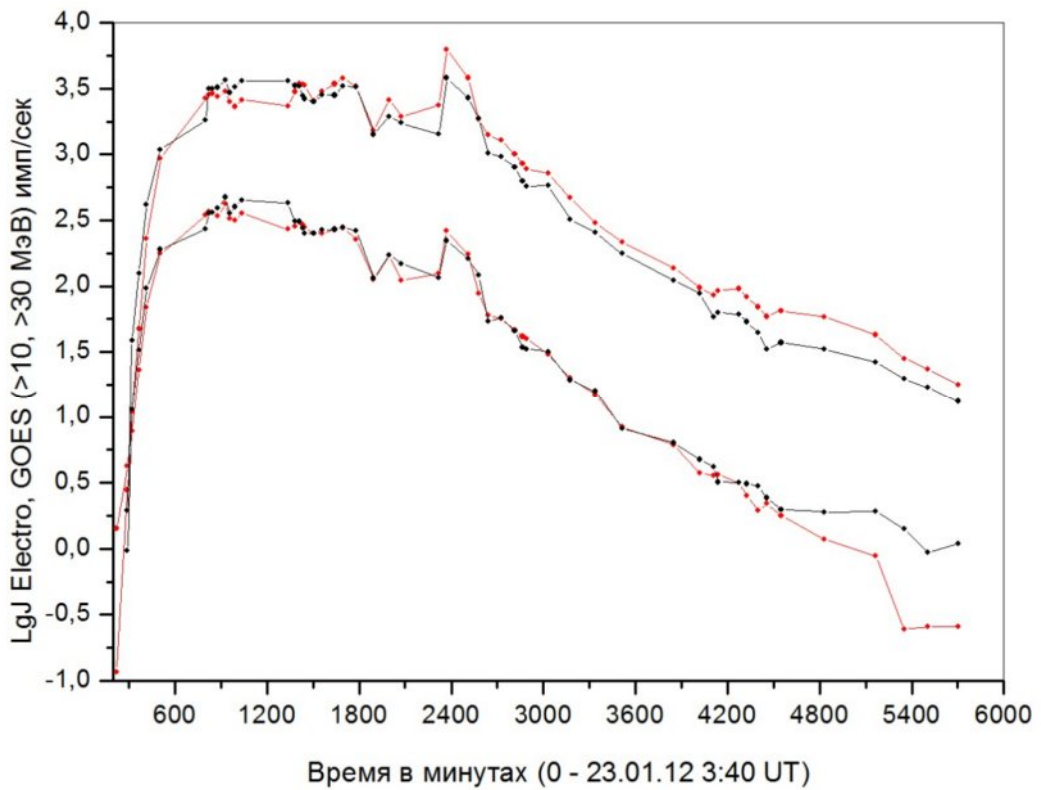


Рис. 8 – Временные ходы потоков протонов с энергией >10 МэВ (верхние кривые) и >30 МэВ (нижние кривые) по данным КА «GOES 15» (красный цвет) и «Электро-Л» (черный цвет) для СПС 23.01.2012 г.

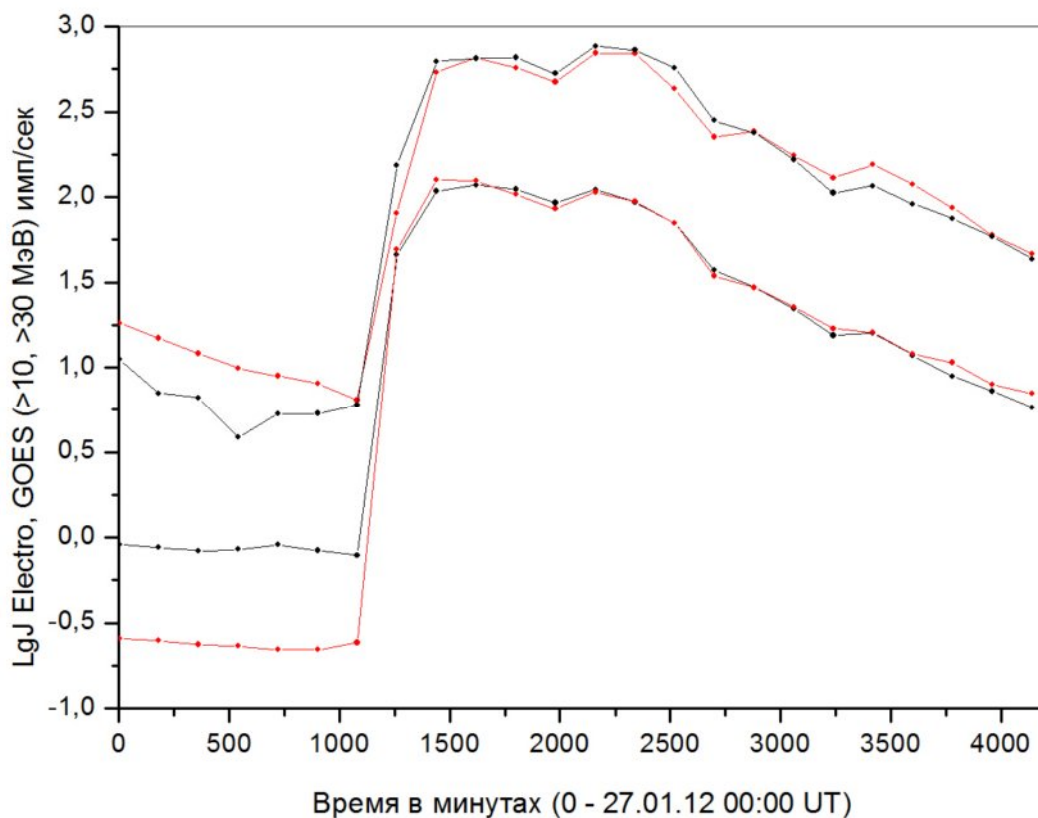


Рис. 9 – Временные ходы потоков протонов с энергией >10 МэВ (верхние кривые) и >30 МэВ (нижние кривые) по данным КА «GOES 15» (красный цвет) и «Электро-Л» (черный цвет) для СПС 27.01.2012 г.

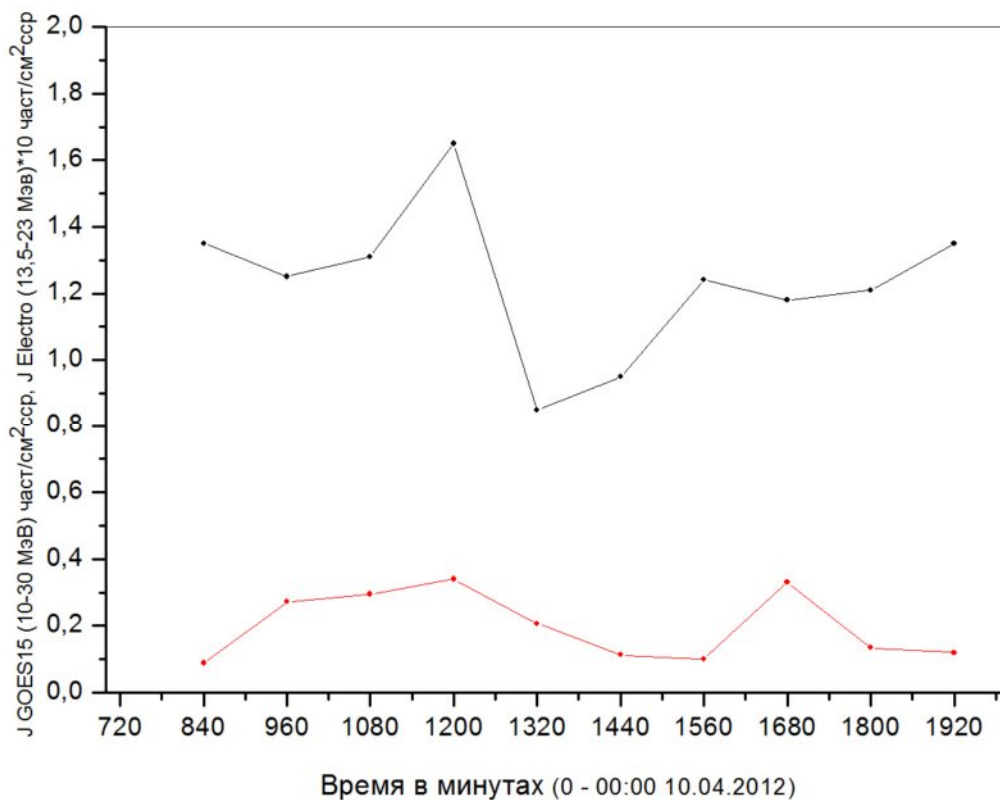


Рис. 10 – Потоки протонов по данным КА «Электро-Л» 13.5-112 МэВ (черный цвет) и КА «GOES 15» >10 МэВ (красный цвет) по данным за 10-11 апреля 2012 года.

Выводы:

Таким образом:

1. Фоновые значения, наблюдаемые на КА «Электро-Л», соответствуют примерно значениям $1 \text{ част/см}^2\text{ср}$, что на порядок превышает реально наблюдаемые фоновые значения $10^{-2} - 10^{-1}$ част/см²ср. Наблюдаемые значения фона связаны с шумами детектирующих устройств КА «Электро-Л».
2. Для детекторов КА «Электро-Л» справедлива линейная зависимость между скоростью счета и величиной потока протонов в интервале от $2 \text{ част/см}^2\text{ср}$ до $10^3 \text{ част/см}^2\text{ср}$ (для энергий $>30 \text{ МэВ}$).
3. Из подобия временных профилей СПС следует отсутствие необходимости корректировки пороговых значений детекторов КА «Электро-Л» в 13.5 МэВ и 23 МэВ .
4. Геометрические факторы для детекторов, регистрирующих протоны в энергетических каналах $13.5-23 \text{ МэВ}$, $23-42 \text{ МэВ}$ примерно одинаковы. Коэффициента пересчета от импульсов в секунду к единицам потока в част/см²ср для них равны 10 и 11 соответственно.
5. Отклонение величин потоков протонов для КА «Электро-Л» и КА GOES не превышает значения 100% для энергий протонов больше 10 МэВ и 50% для энергий протонов больше 30 МэВ .
6. На фазе роста СПС различие значений величин потока протонов по данным КА «Электро-Л» и КА GOES могут быть заметно больше. Причина этого различия, возможно, связана как с анизотропией потоков на фазе роста СПС, так и со значительно более жестким спектром потоков протонов на этой стадии развития СПС. Этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Благодарности. Авторы благодарны д.т.н. А.В. Тертышникову за полезные дискуссии и внимание к материалам статьи.

Литература

1. *Гецелев И.В., Подзолко М.В., Веселовский И.С.* Оптимизация базы данных по потокам межпланетных энергичных протонов и ее применение для моделирования радиационных условий //Астрономический Вестник, 2009, т.43, №2. С. 145-151.
2. *Burov V.A., Ochelkov Y.P.* On measuring energetic (more than 5 MeV) proton fluxes with “Meteor” satellite type //Advances in Space Research, 2007, V. 39, Issue 6. P. 1109-1114.