

DOI: 10.18721/JPM.10314

УДК 523.985.3

## **ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ ДВУХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕГИСТРАЦИИ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**М.И. Савченко, П.В. Ватагин, В.П. Лазутков,  
Д.В. Скородумов, И.В. Кудрявцев, Ю.Е. Чариков**

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

На основе измерений временных и спектральных характеристик мягкого рентгеновского излучения (РИ), зарегистрированного спектрометром «ИРИС», проведено исследование эволюции температуры и меры эмиссии плазмы вспышек на Солнце, произошедших 29.06. 2002 года (В1) и 27.03. 2003 года (В2). В1 была тепловой и не сопровождалась генерацией жесткого РИ. Проведенный анализ данных показал, что за период времени вспышки В1 происходило, как минимум, два последовательных процесса энерговыделения. В2 была заливочной, поэтому с орбиты спутника, где был установлен спектрометр, была зарегистрирована только верхняя часть вспышечной петли, которая и являлась источником мягкого РИ. Анализ данных показал, что на начальной фазе В2 происходил быстрый нагрев плазмы с последующим расширением вспышечной области и увеличением меры эмиссии.

**Ключевые слова:** солнечная вспышка; горячая плазма; вспышечная петля; рентгеновское излучение

**Ссылка при цитировании:** Савченко М.И., Ватагин П.В., Лазутков В.П., Скородумов Д.В., Кудрявцев И.В., Чариков Ю.Е. Диагностика плазмы двух солнечных вспышек на основе результатов регистрации мягкого рентгеновского излучения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2017. Т. 10. № 3. С. 152–160. DOI: 10.18721/JPM.10314

## **THE TWO SOLAR FLARES DIAGNOSTICS BASED ON THE SOFT X-RAY EMISSION RECORDING**

**M.I. Savchenko, P.V. Vatagin, V.P. Lazutkov,  
D.V. Skorodumov, I.V. Kudryavtsev, Yu.E. Charikov**

The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

The time history of the temperature and the emission measure of the solar flare plasma have been studied relying upon the experimental data on the soft X-rays recorded by the IRIS spectrometer on June 29, 2002 (F1) and March 27, 2003 (F2). F1 was a thermal one and was not accompanied by hard X-rays. This data analysis revealed that at least two sequential energy-release processes occurred during F1 event. F2 event took place behind the limb, so only the top part of the flare loop being the soft X-ray source was recorded by the satellite-based spectrometer. From this data analysis, it appeared that the fast plasma heating occurred in the initial stage of F2 and then the flare region expanded and the emission measure of flare plasma increased.

**Key words:** solar flare; hot plasma; flare loop; X-ray emission

**Citation:** M.I. Savchenko, P.V. Vatagin, V.P. Lazutkov, D.V. Skorodumov, I.V. Kudryavtsev, Yu.E. Charikov, The two solar flares diagnostics based on the soft X-ray emission recording, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 10 (3) (2017) 152–160. DOI: 10.18721/JPM.10314

## Введение

Измерение параметров электромагнитного излучения во время солнечных вспышек позволяет проводить диагностику вспышечной плазмы и получать информацию о механизмах накопления и трансформации энергии магнитного поля в тепловую энергию плазмы, в энергию ускоренных частиц и электромагнитного излучения. При этом необходимо отметить, что анализ параметров жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ) дает возможность получать важные сведения о процессах ускорения электронов и их распространения во время вспышек (см, например, работы [1 – 4]). Анализ параметров мягкого рентгеновского излучения дает сведения о динамике нагрева и охлаждения плазмы и об эволюции излучающей области [5].

Настоящая работа посвящена диагностике параметров вспышечной плазмы для двух вспышек на основе измерений в мягком рентгеновском диапазоне спектрометром «ИРИС», установленным на борту космической станции «КОРОНАС-Ф» [6, 7].

## Методическая часть

Интенсивность мягкого рентгеновского излучения в диапазоне 1 – 15 кэВ определяется температурой ( $T$ ) и мерой эмиссии ( $EM$ ) нагретой вспышечной плазмы в предположении тормозного механизма излучения. В статье приводятся результаты расчета температуры и меры эмиссии по мягкому рентгеновскому излучению для двух вспышек GOES-класса C: 29.06.2002 года (C2.6) и 27.03. 2003 года (C2.2). Далее эти вспышки будут для краткости именоваться как В1 и В2.

Спектрометр «ИРИС» [6, 7] предназначен для измерения временных и спектральных характеристик мягкого и жесткого рентгеновского излучения Солнца в диапазоне энергий 2 – 150 кэВ. В силу невысокого энергетического разрешения детекторов вклад отдельных спектральных линий в указанные характеристики незначителен. Мягкое рентгеновское излучение регистрируется пропорциональными детекторами, жесткое – сцинтилляционными детектора-

ми. Оба вида этого излучения регистрируются в 32 энергетических каналах.

Для восстановления параметров вспышечной плазмы мы использовали одно-температурное приближение для описания генерации непрерывного мягкого рентгеновского излучения. В этом приближении рентгеновское излучение описывается как тепловое излучение горячей, оптически тонкой плазмы, частицы которой имеют максвелловское распределение. При этом спектр теплового рентгеновского излучения плазмы с характерным солнечным химическим составом на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца описывается следующим выражением [8]:

$$J(E) = 1,3 \cdot 10^3 \cdot EM \cdot \frac{\exp(-E/T)}{E^{1,4} \cdot T^{0,1}}, \quad (1)$$

где  $J(E)$ , фотон·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>·(кэВ)<sup>-1</sup> – дифференциальный поток рентгеновского излучения на орбите Земли;  $E$ , кэВ – энергия кванта;  $T$ , кэВ – температура плазмы;  $EM = n_e^2 V$ , 10<sup>45</sup>см<sup>-3</sup> – мера эмиссии вспышечной плазмы ( $n_e$  – среднее значение концентрации электронов плазмы в объеме излучающей области  $V$ ).

Выражение (1) позволяет определять температуру и меру эмиссии на основе измеренного спектра мягкого рентгеновского излучения.

Обсудим кратко вопрос об однотемпературной модели плазмы в источнике мягкого рентгеновского излучения. Очевидно, что такое распределение температуры в принципе существовать не может. Нагреваемая во вспышке плазма в процессе энерговыделения должна расширяться (при условии, что геометрия области не термоизолирована, но это маловероятно), т. е. должен существовать фронт тепловой волны, на котором происходит изменение температуры вплоть до коронально-хромосферных значений. Однако в высокоионизованной плазме солнечной короны, как показывают гидродинамические расчеты, профиль температуры представляет собой практически однородный высокотемпературный участок с резким градиентом температуры на тепловом фронте.

Таким образом, на стадии нагрева плазмы мягкое рентгеновское излучение формируется в основном в однородно нагретой, высокотемпературной плазме. На стадии спада рентгеновского излучения естественно происходит расширение и охлаждение плазмы в источнике; при этом градиент температуры на фронте уменьшается, и в излучение могут вносить сопоставимый вклад области с непрерывно уменьшающейся температурой. Точный учет изменения температуры требует гидродинамических расчетов нагрева и охлаждения плазмы. В случае же проведения только оценок параметров плазмы можно пользоваться одно- либо двухтемпературным распределением частиц плазмы.

В работах [9, 10], при интерпретации данных измерений в рамках двухтемпературной модели, отмечалось существование высокотемпературного источника. В статье [11], при нахождении дифференциальной меры эмиссии вспышечной плазмы, использовались данные измерений как рентгеновского (RHESSI, более чувствительного к излучению высокотемпературной плазмы), так и ультрафиолетового (EVE) излучений. Для рентгеновского излучения с энергиями квантов выше нескольких кэВ более характерен диапазон значений температуры для высокотемпературной плазмы  $T > (1,0 - 1,5) \cdot 10^7$  К. Поскольку нижний энергетический порог спектрометра «ИРИС» равен 3 кэВ, полученные нами значения параметров плазмы гораздо ближе к значениям высокотемпературной области.

В однотемпературном приближении температура и мера эмиссии вычисляются по измеренному спектру мягкого рентгеновского излучения с использованием выражения (1).

В процессе работы спектрометр регистрирует значения скоростей счета в различных энергетических каналах  $Ne_i$ . Расчетное же значение скорости счета  $Nc_i$  определяется теоретически при задании конкретного вида спектра фотонов  $J(\varepsilon)$  [4]:

$$Nc_i = \int_0^{\infty} \int_{A_i}^{A_{i+1}} p(A, \varepsilon) J(\varepsilon) dA d\varepsilon, \quad (2)$$

где  $A_i, A_{i+1}$  – амплитуды сигналов детекторов, соответствующие нижней и верхней границе  $i$ -го канала;  $i = 1, 2, \dots, I_{\max}$  ( $I_{\max}$  – количество каналов регистрации);  $p(A, \varepsilon)$  – приборная функция, учитывающая эффективную площадь детектора, а также вероятность того, что при регистрации кванта с энергией  $\varepsilon$  амплитуда сигнала, вырабатываемая детекторами, будет иметь величину  $A$  (определяется энергетическим разрешением детектора);  $J(\varepsilon)$  – дифференциальный поток рентгеновского излучения на орбите Земли (см. выражение (1)).

Параметры распределения (1), а именно температура  $T$  и мера эмиссии  $EM$  определялись по критерию минимизации «хи-квадрат»; последний вычислялся по формуле

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{i=32} (Ne_i - Nb_i - Nc_i)^2 / (Nc_i + Nb_i), \quad (3)$$

где  $Ne_i$  – количество импульсов, экспериментально зарегистрированное в  $i$ -м канале;  $Nb_i$  – их фоновое количество;  $Nc_i$  – их расчетное количество.

Температура и мера эмиссии подбирались таким образом, чтобы значение критерия минимизации хи-квадрат было минимальным.

**Фактор фонового излучения.** Фоновое количество импульсов  $Nb_i$  необходимо определять для каждой вспышки в момент ее развития.

Представленные ниже временные зависимости температуры и меры эмиссии были получены после вычитания фона. В качестве фонового брались скорости счета в энергетических каналах детектора примерно за 5 мин до взрывной фазы вспышки.

Мы считали, что фон определяется рентгеновским излучением плазмы активной области (активных областей) на предвспышечной стадии, которое имеет мягкий спектр (квазиполовое излучение с корональной температурой), а также магнитосферным фоном с более жестким спектром (тормозное излучение энергичных электронов). Однако просто разделить эти компоненты невозможно. О влиянии этих составляющих фона можно косвенно судить по изменению параметров спектра рентгеновского излучения

ния в процессе развития вспышки. Если фон определяется излучением плазмы активных областей с более мягким спектром, то при его вычитании разностный спектр получится жестче начального спектра и, напротив, при вычитании магнитосферного фона разностный спектр получится мягче начального спектра.

Так например, при определении параметров плазмы по рентгеновскому излучению вспышки В1 температура в максимуме вспышки была на 10 – 15 % ниже (т. е. спектр излучения становился мягче) без вычета фона, а мера эмиссии оказывалась в 1,5 – 2 раза выше, чем при определении тех же параметров с вычетом фона.

На стадии спада рентгеновского излучения температура уменьшается до значений 1,1 – 1,3 кэВ и затем остается постоянной, в то время как при определении параметров с вычетом фона температура равномерно уменьшается до значений ниже 0,5 кэВ. Это говорит о том, что на указанной стадии уже становится значимым вклад жесткого магнитосферного фонового излучения, в то время как на фазе максимума вспышки ее излучение в жестких каналах более чем на порядок превышает магнитосферный фон.

### Динамика температуры и меры эмиссии вспышек В1 и В2

Проанализируем динамику изменения температуры и меры эмиссии плазмы для двух рассматриваемых вспышек. Динами-

ка интегральных скоростей счета приведены на рис. 1. Временной профиль В1 в четырех каналах энергии от 2,9 до 14,4 кэВ (рис. 1, а) практически симметричный: время роста и спада вспышечного излучения составляет около 1,5 мин с длительным пиком. Временной профиль В2 несимметричный: стадия роста длится 1,5 – 2,0 мин, а стадия спада – более 5 мин. Интенсивность ЖРИ, измеренная спектрометром «ИРИС», для обеих вспышек не превышает таковой для фонового излучения в данном диапазоне.

Рассмотрим теперь временные профили температуры вспышечной плазмы и меры эмиссии исследуемых вспышек, полученные по ранее описанной методике.

**Вспышка В1.** На рис. 2 приведены полученные зависимости  $T$  и  $EM$  от времени для вспышки В1.

Для В1 следует выделить стадию преднагрева компактной области (с малой мерой эмиссии) до температуры  $2 \cdot 10^7$  К, за которой следует охлаждение в течение 1,5 мин, причем оно сопровождается непрерывным ростом меры эмиссии. Значение температуры  $2 \cdot 10^7$  К сравнимо с температурой в максимуме вспышки. Далее, начиная с момента 00:31:41 UT, развивается основная стадия энерговыделения вспышки, которая сопровождается ростом потока рентгеновского излучения, температуры и меры эмиссии. Рост температуры продолжался до начала фазы максимального потока, после чего следовало плавное паде-

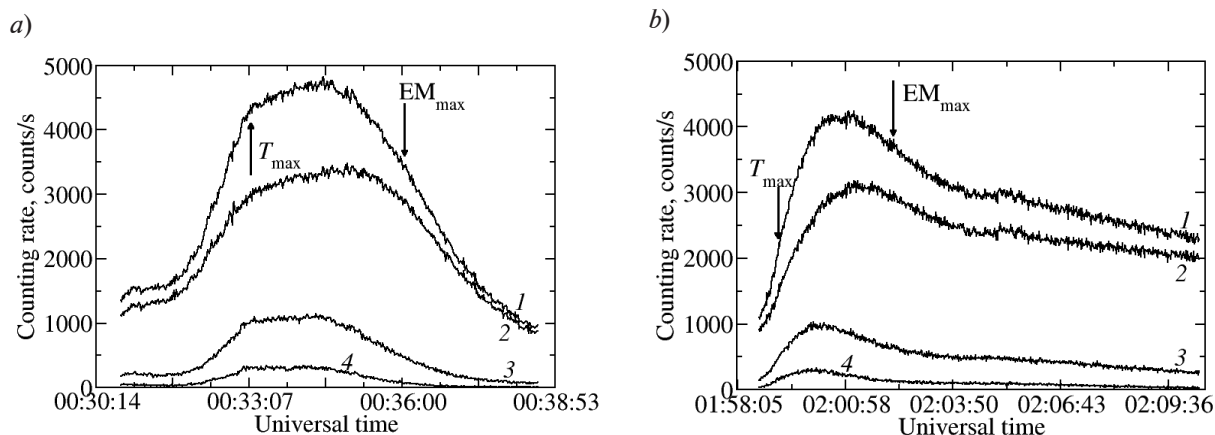


Рис. 1. Динамика интегральных скоростей счета для вспышек В1 (а) и В2 (б) в четырех энергетических каналах: 2,9 – 14,4 кэВ (кривые 1); 2,9 – 6,5 кэВ (2); 6,5 – 10,4 кэВ (3); 10,4 – 14,4 кэВ (4)

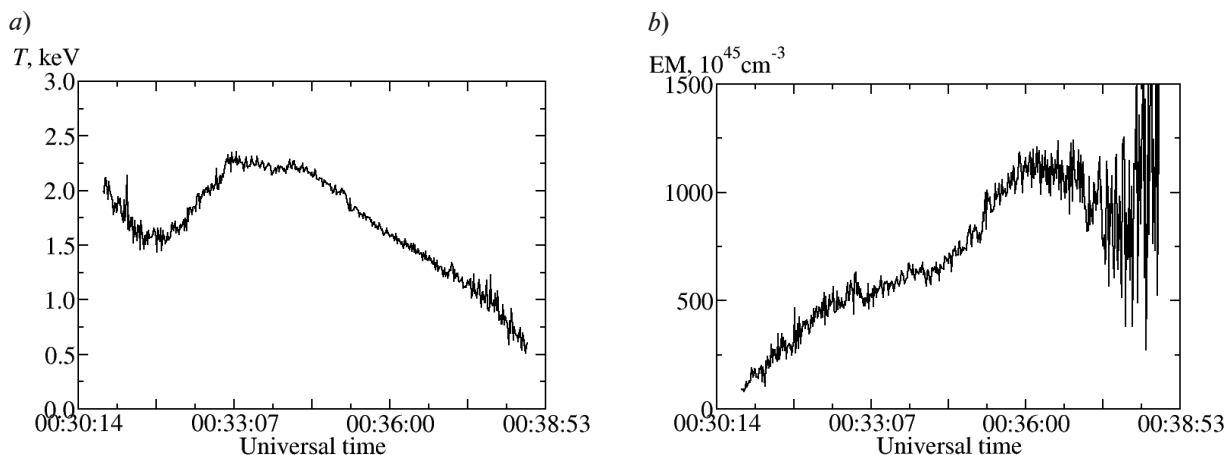


Рис. 2. Временные профили температуры (a) и меры эмиссии (b) вспышки V1

ние температуры, ускорившееся с началом спада потока рентгеновского излучения, которое наступало в момент 00:35UT. При этом некоторое уменьшение меры эмиссии (сопровожаемое ускоренным ростом температуры) к моменту времени 00:33UT свидетельствует в пользу того, что в это время происходит выделение энергии в некоторой локальной области. Снижение температуры на стадии максимума потока не было плавным и имело два локальных максимума, что говорит о кратном выделении энергии в этой вспышке. Мера эмиссии возрастала вплоть до начала спада скорости счета, достигнув значения около  $1,2 \cdot 10^{48} \text{ см}^{-3}$ , затем стала уменьшаться только на стадии глубокого спада

потока рентгеновского излучения и снижения температуры до 1,5 кэВ ( $\approx 1,7 \cdot 10^7 \text{ К}$ ) начиная с момента 00:37UT. Широкий разброс значений меры эмиссии на последней стадии вспышки связан с уменьшением рентгеновского потока и, как следствие, — с недостаточной статистикой.

**Вспышка V2.** Рассмотрим восстановленные значения температуры и меры эмиссии вспышки V2 (рис. 3).

В самом начале взрывной фазы происходит резкий рост температуры и увеличение меры эмиссии вспышечной плазмы. Температура достигла максимума, равного  $2,5 \cdot 10^7 \text{ К}$  в середине стадии роста потока рентгеновского излучения (отмечена стрелкой на рис. 1, b).

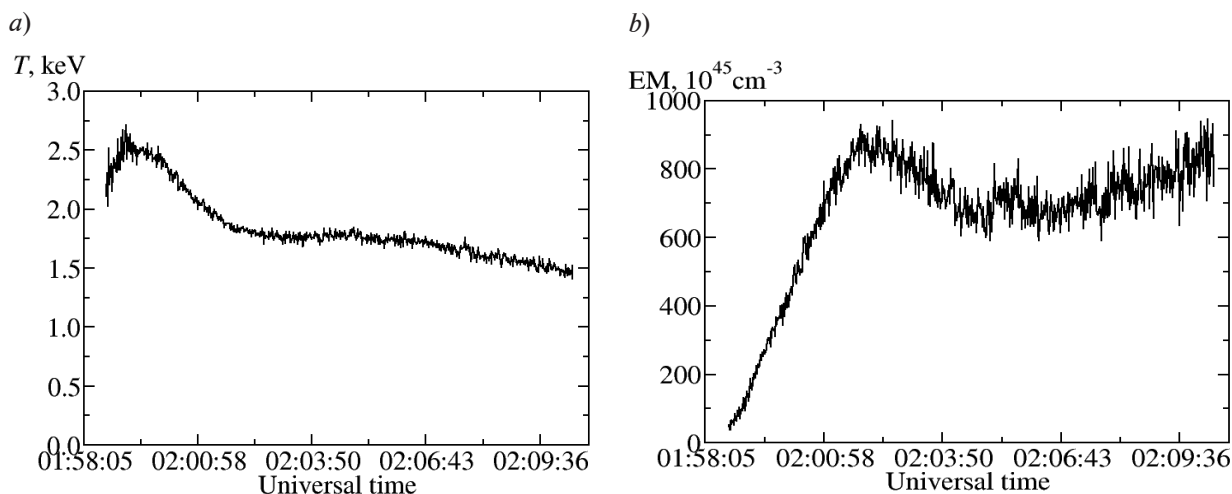


Рис. 3. Временные профили температуры (a) и меры эмиссии (b) вспышки V2



В дальнейшем температура довольно резко снижалась до начала спада мягкого рентгеновского излучения, после чего темп падения замедлился. На фазе спада вспышки наблюдалось локальное повышение рентгеновского потока, температуры и меры эмиссии, что свидетельствует о дополнительном энерговыделении. Мера эмиссии равномерно возростала до начала спада рентгеновского потока, а затем уменьшалась до момента локального всплеска в момент времени около 02:05UT; после этого она показывала плавный рост.

### Обсуждение результатов

Регистрация мягкого рентгеновского излучения во время вспышек 29.06. 2002 года и 27.03. 2003 года (B1 и B2) рентгеновским спектрометром «ИРИС» позволила определить динамику температуры и меры эмиссии плазмы. Следует подчеркнуть, что динамики скорости счета, температуры и меры эмиссии в этих событиях существенно различаются. Так, динамика процессов во время вспышки B1 свидетельствует о наличии стадии преднагрева плазмы, возникновении горячей (температура достигает  $2 \cdot 10^7$  K) компактной области. Фаза развития основного процесса энерговыделения сопровождается ростом как температуры, так и меры эмиссии. При этом момент достижения температурного пика практически совпадает с началом максимума скорости счета, а момент достижения максимума EM лежит на временном промежутке, расположенном на стадии спада потока. Подобная динамика свидетельствует о непрерывном энерговыделении во время данной солнечной вспышки вплоть до максимума потока с последующим тепловым расширением горячей плазмы.

Несколько иной характер процессов нагрева и охлаждения плазмы отмечен во вспышке B2: стадия преднагрева отсутствует, температура плазмы непрерывно растет и достигает максимума, значительно

опережая по времени пик скорости счета при продолжающемся росте меры эмиссии. Другими словами, рост потока, скорее всего, связан с нагреванием и непрерывным расширением локального высокотемпературного источника. При дальнейшем расширении горячей плазмы происходит снижение температуры. Локальный всплеск меры эмиссии около момента времени 02:05UT указывает на расширение горячей области после акта дополнительного энерговыделения. Об этом акте свидетельствует и небольшой рост температуры перед этим максимумом.

Результаты регистрации рентгеновского излучения на космической станции RHESSI показывают, что процесс энерговыделения для ряда вспышек начинается в локальной области, расположенной в вершине вспышечной петли. После этого область, излучающая мягкое рентгеновское излучение, расширяется к основаниям магнитной петли (см. например, работу [12]).

### Заключение

Высокие значения рабочих параметров спектрометра «ИРИС» (временное разрешение и чувствительность) позволяют детально изучать слабые рентгеновские вспышки на Солнце.

Несмотря на различие сценариев развития описанных вспышек, в обоих случаях просматривается неоднократное энерговыделение. Результаты проведенного анализа подтверждают наличие локальной высокотемпературной области в начале развития солнечных вспышек (см., например, работы [9, 10, 12]). Однако остается неясным вопрос об условиях возникновения стадии преднагрева, т. е. для каких вспышек эта стадия существует, а для каких отсутствует. Чтобы найти ответ на этот вопрос, необходимо дальнейшее изучение вспышек различных рентгеновских классов, а также анализ эволюции температуры и меры эмиссии вспышечной плазмы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Aschwanden M.J.** Particle acceleration and kinematics in solar flares — a synthesis of recent observations and theoretical concepts // Space Sci.

Rev. 2002. Vol. 101. No. 1. Pp. 1–227.

2. **Kontar E.P., Brown J.C., Emslie A.G., et al.** Deducing electron properties from hard X-ray

observations // Space Sci. Rev. 2011. Vol. 159. No. 1–4. Pp. 301–355.

3. Моторина Г.Г., Кудрявцев И.В., Лазутков В.П., Савченко М.И., Скородумов Д.В., Чариков Ю.Е. К вопросу о реконструкции энергетического распределения электронов, ускоренных во время солнечных вспышек // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. Вып. 12. С. 11–15.

4. Моторина Г.Г., Кудрявцев И.В., Лазутков В.П., Савченко М.И., Скородумов Д.В., Чариков Ю.Е. Реконструкция энергетического спектра электронов, ускоренных во время солнечной вспышки 15 апреля 2002 г., на основе измерений рентгеновским спектрометром ИРИС // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 4. С. 47–52.

5. Guo J., Liu S., Fletcher L., Kontar E.P. Relationship between hard and soft X-ray emission components of a solar flare // The Astrophysical Journal. 2011. Vol. 728. No. 1. Pp. 1–12.

6. Матвеев Г.А., Дмитриев П.Б., Кудрявцев И.В., Лазутков В.П., Савченко М.И., Скородумов Д.В., Чариков Ю.Е. Спектрометр ИРИС: Исследование временной структуры и энергетических спектров рентгеновского излучения солнечных вспышек. // Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф. Под ред. В.Д. Кузнецова. М.: Физматлит, 2009. С. 366 – 400.

7. Дмитриев П.Б., Кудрявцев И.В., Лазутков В.П., Матвеев Г.А., Савченко М.И., Скородумов Д.В., Чариков Ю.Е. Особенности рентгеновского излучения солнечных вспышек, зарегистрированных спектрометром «ИРИС» во время полета станции «КОРОНАС-Ф» // Астрономический вестник. 2006. Т. 40. Вып. 2. С. 160–170.

8. Crannell C.J., Frost K.J., Matzler C., Ohki K., Saba J.L. Impulsive solar X-ray bursts // The Astrophysical Journal. 1978. Vol. 223. No. 2. Pp. 620–637.

9. Caspi A., Lin R.P. RHESSI line and continuum observations of superhot flare plasma // The Astrophysical Journal Letters. 2010. Vol. 725. No. 2. Pp. L161–L166.

10. Caspi A., Shih A.Y., McTiernan J.M., Krucker S. Hard X-ray imaging of individual spectral components in solar flares // The Astrophysical Journal Letters. 2015. Vol. 811. No. 1. L1. Pp. 1 – 8.

11. Caspi A., McTiernan J.M., Warren H.P. Constraining solar flare differential emission measures with EVE and RHESSI // The Astrophysical Journal Letters. 2014. Vol. 788. No. 2. L31, Pp. 1–6.

12. Krucker S., Battaglia M., Cargill P.J., et al. Hard X-ray emission from the solar corona // Astron. Astrophys. Rev. 2008. Vol. 16. No. 3–4. Pp. 155–208.

Статья поступила в редакцию 27.04.2017, принята к публикации 26.06.2017.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**САВЧЕНКО Михаил Иванович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26  
Mikhail.Savchenko@mail.ioffe.ru

**БАТАГИН Павел Викторович** – младший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26  
pavelvat@gmail.com

**ЛАЗУТКОВ Вадим Петрович** – научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26  
Vadim.Lazutkov@mail.ioffe.ru

**СКОРОДУМОВ Дмитрий Всеволодович** – научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26  
Dmitri.Skorodumov@mail.ioffe.ru

**КУДРЯВЦЕВ Игорь Владимирович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26  
Igor.Koudriavtsev@mail.ioffe.ru

**ЧАРИКОВ Юрий Евгеньевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26  
Yuri.Charikov@mail.ioffe.ru

#### REFERENCES

- [1] **M.J. Aschwanden**, Particle acceleration and kinematics in solar flares – A synthesis of recent observations and theoretical concepts, *Space Sci. Rev.* 101 (1) (2002) 1–227.
- [2] **E.P. Kontar, J.C. Brown, A.G. Emslie, et al.**, Deducing electron properties from hard X-ray observations, *Space Sci. Rev.* 159 (1–4) (2011) 301–355.
- [3] **G.G. Motorina, I.V. Kudryavtsev, V.P. Lazutkov, et al.**, On the reconstruction of the energy distribution of electrons accelerated in solar flares, *Tech. Phys.* 57 (12) (2012) 1618–1622.
- [4] **G.G. Motorina, I.V. Kudryavtsev, V.P. Lazutkov, et al.**, Reconstruction of the energy spectrum of electrons accelerated in the April 15, 2002 solar flare based on IRIS X-ray spectrometer measurements, *Tech. Phys.* 61 (4) (2016) 525–530.
- [5] **J. Guo, S. Liu, L. Fletcher, E.P. Kontar**, Relationship between hard and soft X-ray emission components of a solar flare, *The Astrophysical Journal*. 728 (1) (2011) 1–12.
- [6] **G.A. Matveyev, P.B. Dmitriyev, I.V. Kudryavtsev, et al.**, Spectrometer IRIS: Investigation of the time structure and energy spectra of X-Ray emission from solar flares, *CORONAS-F space mission: key results for solar terrestrial physics, Astrophysics and Space Science Library*. 400 (2014) 359–391.
- [7] **P.B. Dmitriyev, I.V. Kudryavtsev, V.P. Lazutkov, et al.**, Solar flares registered by the IRIS spectrometer on board the CORONAS-F satellite: Peculiarities of the X-ray emission, *Solar Syst. Res.* 40 (2) (2006) 142–152.
- [8] **C.J. Crannell, K.J. Frost, C. Matzler, et al.**, Impulsive solar X-ray bursts, *Astrophysical Journal*. 223 (2) (1978) 620–637.
- [9] **A. Caspi, R.P. Lin**, RHESSI line and continuum observations of superhot flare plasma, *The Astrophysical Journal Letters*. 725 (2) (2010) L161–L166.
- [10] **A. Caspi, A.Y. Shih, J.M. McTiernan, S. Krucker**, Hard X-ray imaging of individual spectral components in solar flares, *The Astrophysical Journal Letters*, 811 (1) (2015) L1, 1–8.
- [11] **A. Caspi, J.M. McTiernan, H.P. Warren**, Constraining solar flare differential emission measures with EVE and RHESSI, *The Astrophysical Journal Letters*, 788 (2) (2014) L31, 1–6.
- [12] **S. Krucker, M. Battaglia, P.J. Cargill, et al.**, Hard X-ray emission from the solar corona, *Astron. Astrophys. Rev.* 16 (3–4) (2008) 155–208.

*Received 27.04.2017, accepted 26.06.2017.*

#### THE AUTHORS

**SAVCHENKO Mikhail I.**

*The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences*  
26, Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation  
Mikhail.Savchenko@mail.ioffe.ru

**VATAGIN Pavel V.**

*The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences*  
26, Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation  
pavelvat@gmail.com

**LAZUTKOV Vadim P.**

*The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences*  
26, Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation  
Vadim.Lazutkov@mail.ioffe.ru



**SKORODUMOV Dmitriy V.**

*The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences*

26, Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation

Dmitri.Skorodumov@mail.ioffe.ru

**KUDRYAVTSEV Igor V.**

*The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences*

26, Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation

Igor.Koudriavtsev@mail.ioffe.ru

**CHARIKOV Yuriy E.**

*The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences*

26, Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation

Yuri.Charikov@mail.ioffe.ru