

О ПОЛОЖЕНИИ ИСТОЧНИКА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ, РЕГИСТРИРУЕМОГО ТЕЛЕСКОПОМ FERMI/LAT В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ

В.И. Киселёв, В.В. Гречнев, А.А. Кочанов, А.М. Уралов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
valentin_kiselev@iszf.irk.ru

ON THE POSITION OF A GAMMA-RAY SOURCE RECORDED BY THE FERMI/LAT TELESCOPE IN A SOLAR FLARE

V.I. Kiselev, V.V. Grechnev, A.A. Kochanov, A.M. Uralov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
valentin_kiselev@iszf.irk.ru

Аннотация. Гамма-излучение является значимым каналом информации о процессах энерговыделения в солнечных вспышках и индикатором ускорения протонов до энергий >300 МэВ. Выяснение положения источника гамма-излучения и его связи с местом вспышки является актуальной задачей, поскольку за ускорение частиц могут быть ответственны как вспышечные процессы в активной области, так и ударные волны, формируемые вне активных областей. Данные наблюдений орбитального телескопа Fermi/LAT позволяют определить солнечные координаты источников гамма-квантов с энергиями >100 МэВ. В рамках этой задачи наибольший интерес представляет гамма-излучение залимбовых вспышек. Возникает вопрос о том, как частицы могли попасть на видимую с Земли поверхность Солнца. Например, гамма-излучение с энергиями >100 МэВ рассматривается как подтверждение сценария, в котором часть протонов, ускоренных на открытой магнитной структуре головной ударной волной перед быстрым корональным выбросом массы (КВМ), высыпается вдали от места вспышки. Ранее для залимбовой эруптивной вспышки 1 сентября 2014 г. было установлено соответствие спектра гамма-излучения распаду пионов, генерируемых при взаимодействиях ускоренных протонов с солнечной плазмой, и найдено положение эффективного центра гамма-излучения (ЭЦГИ) на восточном лимбе вдали от области гиротронного излучения, связанной с этой вспышкой. Однако наши расчеты по данным Fermi/LAT показали зависимость положения ЭЦГИ от пороговой энергии гамма-квантов. Повышение пороговой энергии от 100 до 300 МэВ смещает положение ЭЦГИ к ногам корональных петель, соединенных с областью вспышки.

Ключевые слова: вспышки, гамма-излучение, радиовсплески.

Abstract. Gamma-ray emission is a significant channel of information about energy release processes in solar flares and an indicator of proton acceleration to energies >300 MeV. Localizing the position of a gamma-ray source and its connection with a flare site is an urgent task, because both flare processes in an active region and shock waves excited away from active regions can be responsible for the particle acceleration. Observational data from the Fermi/LAT space telescope make it possible to estimate solar coordinates of gamma-ray photons with energies >100 MeV. Within the framework of this task, gamma-ray emission of behind-the-limb flares is most interesting. A question arises how could particles get onto the solar surface visible from Earth. For example, gamma-ray emission with energies >100 MeV has been considered as evidence for a scenario, in which a part of protons accelerated on an open magnetic structure by a bow shock ahead of a fast coronal mass ejection (CME) precipitates far from the flare region. Previously, it was established for a far-side eruptive flare on 1 September 2014 that the gamma-ray spectrum corresponded to the decay of neutral pions generated in interactions of accelerated protons with solar plasma. The gamma-ray emission centroid (GEC) position was found to be on the east limb far from the region of gyrosynchrotron emission, which was associated with this flare. However, our calculations from the Fermi/LAT data reveal a dependence of the GEC position on the threshold energy of gamma-ray photons. An increase in the threshold energy from 100 to 300 MeV shifts the GEC position to the legs of coronal loops connected to the flare region.

Key words: flares, gamma-ray emission, radio bursts.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения на космическом гамма-телескопе большой площади Fermi/LAT показали, что иногда в связи с солнечными вспышками регистрируется линейчатое γ -излучение [Share et al., 2018], свидетельствующее о ядерных процессах, возбуждаемых ускоренными протонами и ионами. Наиболее важна широкая линия γ -излучения в области энергий выше 100 МэВ над тормозным континуумом, возникающая при распаде нейтральных пионов, генерируемых при ядерном взаимодействии протонов с энергиями >300 МэВ с солнечной плазмой $p+A \rightarrow \pi^0+A'$; $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ [Ramaty et al., 1975]. В нескольких случаях длительное γ -излучение пионного распада зарегистрировано в связи с залимбовыми вспышками — например, 1 сентября 2014 г.

Для этой вспышки установлено соответствие спектра γ -излучения пионного распада и найдено поло-

жение эффективного центра γ -излучения (ЭЦГИ) >100 МэВ на восточном лимбе вдали от места вспышки [Ackermann et al., 2017]. Такое излучение рассматривается сторонниками гипотезы ускорения протонов головной ударной волной перед быстрым корональным выбросом массы (КВМ) как подтверждение сценария, в котором протоны, ускоренные ударной волной на открытой магнитной структуре, частью уходят в межпланетное пространство, а частью высыпаются в плотную хромосферу вдали от места вспышки, производя γ -излучение, наблюдаемое со стороны Земли [Cliver et al., 1993]. Однако Hudson [2018] указал: 1) большое пробочное отношение препятствует высыпанию частиц, ускоренных ударной волной высоко в короне; 2) оцениваемого числа ускоренных протонов в межпланетном пространстве недостаточно, чтобы обеспечить наблюдаемые интенсивности γ -излучения.

Для определения источника ускорения протонов особенно важно исследование γ -излучения, связанного с залимбовыми солнечными вспышками. Анализ наблюдений залимбового события 2014.09.01 в ряде работ (например, [Ackermann et al., 2017, Hudson, 2018]) не привел к консенсусу в вопросе о том, как протоны попали на видимую с Земли поверхность Солнца. Мы анализируем особенности электромагнитного излучения, корональную конфигурацию, область γ -излучения и его спектр в этом событии.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И КОРОНАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ

Событие 2014.09.01 наблюдалось с разных направлений. Излучение вспышки, не скрытое за лимбом, наблюдалось обсерваториями Марс Одиссей на околомарсианской орбите и STEREO-B. Со стороны Земли наблюдалось жесткое рентгеновское и микроволновое излучение, более длительное, чем два коротких жестких рентгеновских всплеска, зарегистрированных детектором HEND на борту Марс Одиссей. Наблюдавшийся с Земли микроволновый всплеск также состоял из двух частей; вторая часть длилась около получаса. Всплеск γ -излучения был еще продолжительнее.

Сравнение корональных петель, наблюдавшихся в крайнем ультрафиолете (КУФ), с линиями магнитного поля, экстраполированными в потенциальном приближении из области вспышки, представлено на рис. 1. Длинные петли вблизи экватора на рис. 1, *a* соответствуют силовым линиям на рис. 1, *б*. Гиротронный источник на рис. 1, *a*, ответственный за второй продолжительный радиовсплеск, расположен в нижней части этих петель. Согласно результатам работы [Ackermann et al., 2017], эффективный центр гамма-излучения (ЭЦГИ) аналогичный центру тяжести находился в другом месте, в обширной области, покрытой короткими петлями, не связанными с областью вспышки. В работе [Jin et al., 2018] аргументировано, что частицы, ответственные за γ -излучение >100 МэВ, были ускорены в области КВМ, и в результате магнитного пересоединения эруптивных и крупномасштабных корональных структур высыпались на солнечную поверх-

ность вблизи ЭЦГИ. Этот сценарий, соответствующий аномальной эрупции, проявляющейся в КУФ и сопровождающейся отрицательными радиовсплесками, не подтвердился наблюдениями. Кроме того, пересоединение должно проникнуть глубоко в область замкнутых полей, чтобы достичь фотосферы.

Смещение ЭЦГИ от его ожидаемого положения в области петель на рис. 1, *б* возможно из-за вклада вторичных γ -квантов, образующихся при взаимодействиях: 1) космических лучей с солнечной короной; 2) потоков ускоренных частиц и излучения из области вспышки с плазмой корональных струй; 3) космических лучей и вспышечного излучения с КВМ; 4) солнечных ускоренных частиц с солнечным ветром [Kahler, Ragot, 2008]. Энергии вторичных γ -квантов ниже первичных, поэтому положение ЭЦГИ при наличии вклада вторичных γ -квантов должно изменяться с повышением нижнего порога рассматриваемых энергий.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ПОИСКА ПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Для анализа использован фотонный файл, включающий событие 2014.09.01, доступный по адресу [fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data]. Файл содержит время, энергию, положение, направление прихода, измененные для каждого γ -кванта из множества дискретных источников, зарегистрированных в интервале наблюдений. Из файла вначале были отобраны события в пределах области, центрированной на Солнце. Низкая околоземная орбита спутника Fermi/LAT приводит к засветке от Земли. Для ее уменьшения дополнительно отобраны события с зенитным углом менее 100° . Анализируемая выборка содержит ≈ 3000 событий.

Выполнялся отбор событий с энергиями выше пороговой и решалась обратная задача поиска аналитической функции наблюдаемого распределения. Для определения положения ЭЦГИ применялась непараметрическая оценка распределения плотности вероятности наблюдаемых событий с использованием гауссовых ядер и с учетом положения источника. Была использована функция, автоматически

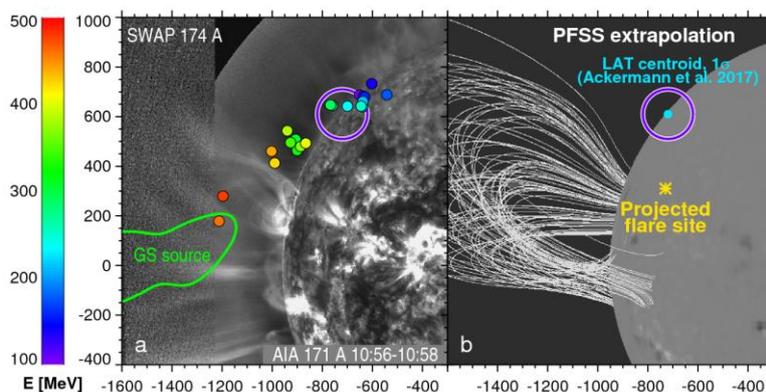


Рис. 1. Изображение, составленное из данных AIA 171 Å и SWAP 174 Å. Зеленый контур — гиротронный источник. Окружность — положение ЭЦГИ [Ackermann et al., 2017]. Дискарами отмечены положения ЭЦГИ при разных энергетических порогах (шкала слева) (*a*). Восстановленное магнитное поле. Область залимбовой вспышки отмечена звездочкой (*б*)

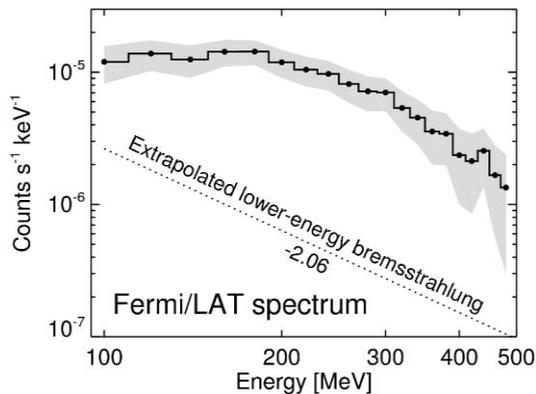


Рис. 2. Спектр фотонных событий по данным Fermi/LAT. Ошибки показаны серым фоном

определяющая ширину распределения и позволяющая определить положения нескольких источников, реализованная на языке Python [https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.gaussian_kde.html]. В событии 2014.09.01 этим методом удалось найти одно ядро.

Для проверки роли вклада вторичных γ -квантов по данным Fermi/LAT вычислено смещение ЭЦГИ при исключении γ -квантов с энергиями ниже заданной. Положение ЭЦГИ при пороге 100 МэВ оказалось близким к результату [Ackermann et al., 2017]. С повышением нижней энергии с шагом 50 МэВ положение ЭЦГИ монотонно смещается вдоль лимба в юго-восточном направлении. Повышение пороговой энергии от 100 до 300 МэВ сместило ЭЦГИ по широте на 30° в сторону гиротронного источника в корональных петлях.

СПЕКТР ФОТОННЫХ СОБЫТИЙ ПО ДАННЫМ Fermi/LAT

Информация об энергии каждого γ -кванта позволила по данным Fermi/LAT построить спектр и оценить ошибки. Результат представлен на рис. 2. Пунктиром показана экстраполяция тормозного излучения в области более низких энергий. В работе [Ackermann et al., 2017] тормозной спектр имеет экспоненциальный спад на высоких энергиях, и пунктир на рис. 2 представляет оценку этого вклада сверху. Спектр γ -излучения в области >100 МэВ соответствует пионному распаду в согласии с результатом [Ackermann et al., 2017].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения и вычисления указывают на общность положений источников гиротронного, жесткого рентгеновского и γ -излучения. Продолжительное гиротронное излучение было близким по форме и длительности жесткому рентгеновскому всплеску, наблюдавшемуся со стороны Земли, и γ -излучению >100 МэВ. Длительное электромагнитное излучение могло генерироваться электронами и протонами, захваченными в высоких петлях. На положение эффективного центра γ -излучения влияют посторонние источники γ -квантов, что подтверждает его зависимость от нижней границы учитываемых энергий. В событии 1 сентября 2014 г. при повышении пороговой энергии от 100 до 300 МэВ положение γ -источника становится близким к корональным петлям, связанным с местом вспышки.

Авторы благодарны инструментальным коллективам за предоставленные данные. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-12-00172).

REFERENCES

- Ackermann M., Allafort A., Baldini L., et al., Fermi-LAT observations of high-energy behind-the-limb solar flares // *Astrophys. J.* 2017, V. 835, P. 219.
- Cliver E.W., Kahler S.W., Vestrand W.T. On the origin of gamma-ray emission from the behind-the-limb flare on 29 September 1989 // In: Leahy, D.A., Hicks, R.B., Venkatesan, D. (eds.) *Internat. Cosmic Ray Conf. 3*, World Scientific, Singapore. 1993. V. 3. P. 91.
- Hudson H.S. The relationship between long-duration gamma-ray flares and solar cosmic rays // In: Foullon, C., Malandraki, O.E. (eds.) *Space Weather of the Heliosphere: Processes and Forecasts*, IAU Symp., Cambridge University Press, Cambridge. 2018. V. 335. P. 49–53.
- Jin M., Petrosian V., Liu W., et al., Probing the Puzzle of Behind-the-limb γ -Ray Flares: Data-driven Simulations of Magnetic Connectivity and CME-driven Shock Evolution // *Astrophys. J.* 2018. V. 867, iss. 2. Article id. 122. 13 p.
- Kahler S.W., Ragot B.R. Remote sensing of gamma-ray emission from solar energetic proton interactions with the solar wind // *Astrophys. J.* 2008. V. 675. P. 846.
- Ramaty R., Kozlovsky B., Lingenfelter R.E. Solar Gamma Rays // *Space Sci. Rev.* 1975. V. 18, iss. 3. P. 341–388.
- Share G.H., Murphy R.J., Tolbert A.K., et al. Characteristics of sustained >100 MeV gamma-ray emission associated with solar flares // *Astrophys. J.* 2018. V. 869. P. 182.
- URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.gaussian_kde.html.
- URL: fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data.