АНАЛИЗ СВОЙСТВ СОБЫТИЙ В СКЛ И ИХ СОЛНЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ С УЧЕТОМ МАГНИТО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

**Жукова А.В.¹, Кашапова Л.К.², Митева Р.³,
Жданов Д.А.², Мешалкина Н.С.², Мягкова И.Н.⁴**

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

³Институт астрономии и Национальная Астрономическая обсерватория БАН,
София, Болгария

⁴Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва, Россия

ANALYSIS OF PROPERTIES OF SEP EVENTS AND THEIR SOLAR SOURCES CONSIDERING THE MAGNETO- MORPHOLOGY CLASSIFICATION OF ACTIVE REGIONS

**Zhukova A.V.¹, Kashapova L.K.², Miteva R.³,
Zhdanov D.A.², Meshalkina N.S.², Myagkova I.N.⁴**

¹Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

²Institute of Solar-Terrestrial Physics of SB RAS, Irkutsk, Russia

³Institute of Astronomy and National Astronomical Observatory, BAS, Sofia, Bulgaria

⁴Skobelitsyn Institute of Nuclear Physics of MSU, Moscow, Russia

We studied 87 solar energetic particle (SEP) events relating flares with GOES class larger than M5, which were observed during solar cycle 23 to detect the relationship between spectral parameters of SEPs and characteristics of the related flares. The ARs magneto-morphology classification (MMC) was applied to take into account the magnetic topology features of ARs that produced the flares. We separated all ARs into three categories: A-type - regular bipolar ARs; U-type – unipolar spots; B-type – irregular ARs which violate either Hale polarity law, or Joy's law, or having the leading spot less than the main following spot. We used the parameters of the MW spectrum as indicators of acceleration processes during solar flares. Our analysis showed the following. Most of the related to proton-rich SEP events ARs are violated at least one of the named above classical sunspot group evolution laws. Statistics for regular ARs of cycles 23 and 24 are reverse: the regular ARs domination is obvious. Revealed dependencies between spectral properties of electrons and protons and indicators of the acceleration process are studied and discussed taking into account MMC types of ARs related to SEP origin.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-105-108

В настоящее время нет однозначного понимания того, какие механизмы ускорения определяют свойства и параметры заряженных частиц в событиях солнечных космических лучей (СКЛ) [1]. Существуют две гипотезы, как соперничающие, так и дополняющие друг друга, – ускорение происходит или во время вспышек в атмосфере Солнца, или же на ударных волнах, порождаемых корональными выбросами массы (КВМ). В зависи-

мости от доминирования той или иной гипотезы необходимо корректировать как теоретические модели, так и методики прогноза событий СКЛ. Прямыми индикаторами процессов ускорения в солнечной атмосфере являются рентгеновское и гамма-излучение. Однако из-за низкого порога чувствительности современных детекторов эффективность использования наблюдений в этих спектральных областях ограничена. Другим источником информации о процессах ускорения может служить микроволновое излучение (МВ), так как оно более чувствительно к изменениям потоков электронов. Несмотря на то, что события в СКЛ обусловлены в основном потоками протонов, в работах [2, 3] показана связь между данными, полученными в рентгеновском и МВ диапазонах, с одной стороны, и изменениями потоков протонов, с другой. Еще одним неясным вопросом остается связь механизмов ускорения частиц СКЛ и их свойств с магнитной топологией АО, производящих вспышки и являющихся источниками событий СКЛ [4]. Настоящая работа продолжает исследования, начатые в работе [5]. Ее целью является изучение связи между таким параметром микроволнового спектра как пиковая частота и индикаторами процессов ускорения протонов и электронов, с учетом свойств солнечных источников событий СКЛ – классом АО в соответствии с магнито-морфологической классификацией (MMC), предложенной в работе [6].

Пиковые потоки протонов определялись по данным инструмента SOHO/ERNE в спектральных полосах, определяемых как каналы 25 МэВ и 50 МэВ. Учитывались протонные события, произведенные в 23-м цикле вспышками GOES класса M5 и выше, имеющие отклик в обоих энергетических каналах. Для учета эффекта насыщения протонные потоки корректировались по методике, описанной в работе [7]. Подобный отбор для электронов проводился на основе данных инструмента ACE/EPAM в каналах 0.139 МэВ и 0.245 МэВ. Подбирались наиболее близкие по времени записи для протонов и электронов. Солнечные источники вспышек и KBM определялись в соответствии со стандартными временным и позиционным критериями [8, 9]. Отклик в МВ диапазоне для выявленных источников проверялся по данным сети Radio Solar Telescope Network (RSTN). В качестве индикатора ускорительных процессов использовалось значение пиковой частоты (частоты, на которой поток достигает максимального значения).

Отобранные 87 событий связаны с солнечными вспышками, произошедшими в 53 АО 23-го цикла с различной конфигурацией магнитного поля. Данные инструмента SOHO/MDI и MMC позволили учесть их магнитную топологию, распределив все АО на три группы: А – регулярные АО, удовлетворяющие основным закономерностям теории динамо среднего поля (закону полярностей Хейла, закону о широтной зависимости угла наклона магнитной оси биполярных АО Джоя, правилу о соотношении

площадей лидирующего/хвостового пятен); В – АО с нарушениями закономерностей; U – одиночные пятна (как правило, остатки регулярных АО).

Мы обнаружили, что только $\approx 27\%$ из всех исследуемых событий 23-го цикла произошли в регулярных АО, тогда как $\approx 60\%$ наблюдались в АО-нарушителях. Статистические исследования АО 23-го цикла показывают противоположную тенденцию: регулярные АО (группа А) составляют большинство ($\approx 65\%$), тогда как АО с нарушениями (группа В) – около четверти от всех групп пятен. Это согласуется с данными, приведенными в работе [6] для 24-го цикла. Из 87 солнечных вспышек, связанных с СКЛ, информацию о пиковой частоте удалось получить для 52 событий. На рис. 1 представлена зависимость отношения потоков протонов от пиковой частоты для групп А + U и группы В. Отношение потоков для группы А + U уменьшается с ростом пиковой частоты (до значения ≈ 5 ГГц), после чего стабилизируется. Эта тенденция согласуется с данными, полученными ранее в работе [3] (см. там рис. 3). В тоже время события, связанные с группой В, не показывают явной тенденции. Подобное различие в поведении этого параметра МВ спектра было обнаружено для отношения потоков протонов с энергиями 10 МэВ и 30 МэВ (для выборки из 24 событий 23-го цикла, имевших отклик в жестком рентгеновском диапазоне) [10].

Рис. 1. *Левая панель:* Зависимости отношения потоков для двух спектральных полос потоков протонов в событиях СКЛ относительно пиковой частоты для групп А и U. *Правая панель:* Та же зависимость для группы В.

На рис. 2 представлена зависимость отношения потоков электронов от пиковой частоты для групп А + U и группы В. Для групп А + U (левая панель) наблюдается слабая тенденция увеличения отношения потоков электронов с ростом пиковой частоты (противоположная тенденции, выявленной для протонов). Это позволяет связать рост числа протонов с высокими энергиями (при увеличении частоты) с наличием сильного магнитного поля в источнике МВ излучения. Для событий, связанных с АО группы В (правая панель), явных тенденций не обнаружено.

Рис. 2. *Левая панель:* Зависимости отношения потоков для двух спектральных полос потоков электронов в событиях СКЛ относительно пиковой частоты для групп А и U. *Правая панель:* Та же зависимость для группы В.

Таким образом, только для событий, связанных с регулярными АО (подчиняющимися закономерностям теории динамо), удалось выявить тенденции, которые можно интерпретировать в рамках известной модели солнечной вспышки. Большинство событий СКЛ, связанных с солнечными вспышками классом больше М5, происходили в АО с нарушениями закономерностей теории динамо; явных тенденций для них не обнаружено.

А.Ж. благодарит за поддержку Минобрнауки НИР 0831-2019-0006. Работа Л.К., Д.Ж. и Н.М. поддержана базовой финансовой программой ФНИ П.16 и частично поддержана программой № 28 Президиума РАН.

Литература

1. Klein, K.-L., Dalla S. // Space Sc. Reviews, 2017, 212, 1107.
2. Kahler, S.W. // J. Geophys. Res., 1982, 87, 3439.
3. Chertok, I.M., Grechnev, V.V., Meshalkina, N.S. // Astronomy Reports, 2009, 53, 1059.
4. Bronarska, K., Michalek, G. // Advances in Space Research, 2017, 59, 384.
5. Kashapova L.K., Miteva R., Myagkova I.N., Bogomolov A.V. // Solar Phys., 2019, 294, 9.
6. Abramenko, V.I., Zhukova, A.V., Kutsenko, A.S. // Geomagn. and Aeron., 2018, 58, 1159.
7. Miteva, R., Samwel, S.W., Costa-Duarte, M.V. // JASTP, 2018, 180, 26.
8. Papaioannou A., Sandberg, I., Anastasiadis, A., et al. // JSWSC, 2016, 6, A42.
9. Miteva, R., Samwel, S.W., Costa-Duarte, M.V. // Solar Phys., 2018, 293, 27.
10. Kashapova, L.K., Meshalkina, N.S., Miteva, R., et al. / Proc. of Eleventh Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, Primorsko, Bulgaria, June 3–7 2019, p. 185.