ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ В СКЛ НА ОСНОВЕ МИКРОВОЛНОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

**Кашапова Л.К.¹, Жукова А.В.², Мешалкина Н.С.¹,
Митева Р.^{3,4}, Мягкова И.Н.⁵**

¹*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

²*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия*

³*Институт космических исследований и технологий БАН, София, Болгария*

⁵*Институт Астрономии и Национальная Астрономическая обсерватория, БАН,
София, Болгария*

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

THE SEP SOLAR ORIGIN FEATURES STUDY BASED ON THE MICROWAVE OBSERVATIONS WITH ARS MAGNETO-MORPHOLOGY CLASSIFICATION USE

**Kashapova L.K.¹, Zhukova A.V.², Meshalkina N.S.¹,
Miteva R.^{3,4}, Myagkova I.N.⁵**

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics of SB RAS, Irkutsk, Russia*

²*Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia*

³*Space Research and Technologies Institute, BAS, Sofia, Bulgaria*

⁴*Institute of Astronomy and National Astronomical Observatory, BAS, Sofia, Bulgaria*

⁵*Skobelitsyn Institute of Nuclear Physics of MSU, Moscow, Russia*

The active regions magneto-morphology classification was applied to analyze the microwave (MW) emission in solar flares related to the strong solar energetic particle (SEP) events observed during the 23rd solar cycle. 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 spotless 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 during their evolution, whereas the statistical study of all ARs of the cycle revealed the regular sunspot groups domination. Revealed dependences between SEP events and MW indicators of the acceleration process for different groups are discussed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-201-204

Целью настоящего исследования является проверка взаимосвязи различных магнито-морфологических групп активных областей с солнечными источниками событий в солнечных космических лучах (СКЛ), сопровождающихся значительными потоками протонов, и проведение статистического анализа параметров микроволнового (МВ) излучения, характеризующих процессы ускорения частиц. Вопрос о механизмах источников уско-

рения заряженных частиц в событиях СКЛ остается открытым до сих пор [1]. Согласно, современному представлению, оно происходит или во время вспышек в атмосфере Солнца или же на ударных волнах, порождаемых корональными выбросами массы (КВМ).

Прямыми индикаторами ускорительных процессов в солнечной атмосфере являются рентгеновское и гамма излучение. Однако низкий порог чувствительности современных детекторов в этих спектральных диапазонах приводит к потере информации о большинстве событий. МВ излучение более чувствительно к изменениям потоков ускоренных электронов, но использование МВ наблюдений сталкивается с рядом трудностей. Во-первых, наиболее важной частью СКЛ являются протоны, в то время как МВ излучение генерируется электронами. Тем не менее, Черток и др. [2] показали высокую корреляцию протонных потоков СКЛ и свойств МВ излучения. Во-вторых, на спектральные свойства МВ излучения могут влиять сразу несколько параметров, таких как напряженность магнитного поля, поток частиц и т.д. Это приводит к противоречиям в результатах различных статистических исследований, тогда как исследования отдельного события, как правило, дают согласованную картину. Возможно, причиной рассогласования может являться неоднородность физических/морфологических свойств солнечных источников, в том числе и активных областей (АО).

По каталогу протонных событий [3] были отобраны АО с солнечными вспышками, сопровождавшимися событиями в СКЛ с сильными протонными потоками. События должны были иметь также отклик в жестком рентгеновском диапазоне (данные инструмента CORONAS/SONG, обладающего высокой чувствительностью к слабым потокам в нетепловом рентгеновском диапазоне). Для локализации выбранных событий использовались наблюдения RHESSI. Анализ параметров МВ спектров проводился на основе наблюдений сети радиотелескопов RSTN; в некоторых случаях мы использовали также доступные данные радиополяриметров Nobeyama для улучшения спектрального разрешения МВ спектров. После перекрестной проверки список оставшихся событий составил 24 солнечных вспышки, удовлетворяющие всем требуемым условиям.

Исследуемые события происходили в 22 АО 23-го цикла, имевших различную конфигурацию магнитного поля. Для учета магнитной топологии солнечных источников, мы воспользовались магнито-морфологической классификацией активных областей (АО), предложенной в [4]. Данные инструмента MDI/SOHO позволили нам разделить все исследуемые 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 лидирующего/хвостового пятен);

В – АО-нарушители, отклоняющиеся от этих закономерностей; U – одиночные пятна (как правило, остатки регулярных АО).

Мы обнаружили, что доля регулярных АО в выборке событий 23-го цикла составила около 25%, а доля нарушителей – более 50%. Отметим, что среди всех АО цикла наблюдается противоположная картина: регулярные АО занимают более 50%, а АО группы В – около четверти. Подобное распределение всех АО проявлялось и в 24-м цикле [4].

Для сравнительного анализа связи мощности протонных событий и параметров, характеризующих процессы ускорения, мы использовали соотношение максимумов потоков частиц с энергиями выше 10 МэВ и 30 МэВ. Более низкое значение этой величины соответствует большему количеству протонов, обладающих более высокими энергиями. В качестве индикаторов ускорительных процессов нами использовались значения пиковой частоты и электронного спектрального индекса. Пиковая частота – это частота, на которой поток достигает максимального значения. Спектральный индекс δ электронов вычисляли по формуле $\delta = 1,1 * (\alpha - 1,2)$ [9], где α – микроволновой спектральный индекс, оцениваемый как наклон спектра на частотах выше пиковой частоты.

Анализ зависимости отношения протонных потоков от пиковой частоты представлен на рис. 1. Для групп А и U (левая панель, звездочки и плюсы, соответственно) обнаружено, что события, сопровождающиеся потоками протонов с высокими энергиями, соответствуют более высокому значению пиковой частоты. Однако высокая пиковая частота может быть обусловлена как более сильным магнитным полем в излучающем источнике, так и большими потоками ускоренных электронов. Для событий, связанных с АО группы В (правая панель, ромбы), тренд не обнаружен.

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

Для зависимости отношения протонных потоков от спектрального индекса (рис. 2) тенденции те же. Тренд для групп А и U на левой панели хорошо согласуется с результатами Daibog et al. [5]. Данная тенденция может быть объяснена тем, что более мягкий спектральный индекс обычно связан с большей высотой места первичного энерговыделения в короне и, соответственно, с лучшими условиями выхода ускоренных частиц в межпланетное пространство.

Рис. 2. Левая панель: Зависимости отношения потоков двух спектральных полос потоков протонов в событиях СКЛ относительно электронного спектрального индекса для групп А и U. Правая панель: Та же зависимость для группы В.

В результате проведенного исследования мы можем сделать следующие выводы. У большинства АО 23-го цикла, связанных с сильными протонными событиями в СКЛ, наблюдаются нарушения закономерностей теории динамо среднего поля, тогда как в цикле в целом преобладают регулярные АО. Для событий, связанных с регулярными АО, в зависимостях отношения протонных потоков от пиковой частоты и спектрального индекса наблюдаются тенденции, согласующиеся с результатами других авторов [5] и предсказанные моделями солнечных вспышек. Для событий, происходивших в АО с нарушениями, явных тенденций не обнаружено.

Литература

1. Klein, K.-L., Dalla S. // Space Sc. Reviews, 2017, 212, 1107.
2. Chertok, I.M., Grechnev, V.V., Meshalkina, N.S. // Astronomy Reports, 2009, 53, 1059.
3. Papaioannou A., Sandberg, I., Anastasiadis, A., et al. // MNRAS, 2016, 451, 1522.
4. Abramenko, V.I., Zhukova, A.V., Kutsenko, A.S. // Geomagn. and Aeron., 2018, 58, 1159.
5. Daibog, E.I., Melnikov, V.F., Stolpovskii, V.G. // Solar Phys., 1993, 144, 361.