

ПЕКУЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ В МИНИМУМЕ 24-ого ЦИКЛА

Черток¹ И.М., Белов¹ А.В., Абунин^{1,2} А.А., Абунина¹ М.А.

¹ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия

²КалмГУ, Элиста, Россия

ichertok@izmiran.ru

PECULIAR EVENTS OF SOLAR ACTIVITY AND SPACE WEATHER AT THE MINIMUM OF CYCLE 24

Chertok¹ I.M., Belov¹ A.V., Abunin^{1,2} A.A., Abunina¹ M.A.

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²Kalmyk State University, Elista, Russia

We analyzed two sets of the outstanding solar activity and associated space weather disturbances occurred during the minimum of cycle 24. In powerful flares of 4–10 September 2017, parameters of protons arrived to Earth correspond to characteristics of solar radio bursts. On 20–26 August 2018, a filament eruption from the central sector of the solar disk caused the third-intensity geomagnetic storm and a rather weak but peculiar Forbush decrease.

В глубоком минимуме довольно слабого 24-ого цикла, в начале сентября 2017 г. и второй половине августа 2018 г., произошли два значительных ансамбля солнечной активности и возмущений космической погоды.

1. Выдающийся всплеск вспышечной активности 4–10 сентября 2017 г., связанный с рекордно быстрым развитием и усложнением магнитной структуры активной области AR12673 на западной половине диска, включал в себя большое число мощных вспышек, в том числе две самые сильные в цикле вспышки рентгеновского балла X9.3, X8.9 и, по крайней мере, три значительные солнечные протонные события (СПС). Мы проанализировали эти СПС на основе методики количественной радиодиагностики протонных вспышек, разработанной в ИЗМИРАН в 1970–1980-х гг. (см. [1–3]).

Методика исходит из того, что параметры интенсивности микроволновых всплесков на частотах $f \sim 3\text{--}15$ ГГц, хотя последние и генерируются электронами, распространяющимися к фотосфере, отражают количество ускоренных частиц, в том числе проходящих к Земле протонов с энергией десятки МэВ. Более того, в [3] было показано, что существует прямая статистическая зависимость между частотным спектром микроволновых всплесков и показателем степенного энергетического спектра наблюдаемых у Земли потоков протонов с энергией десятки МэВ.

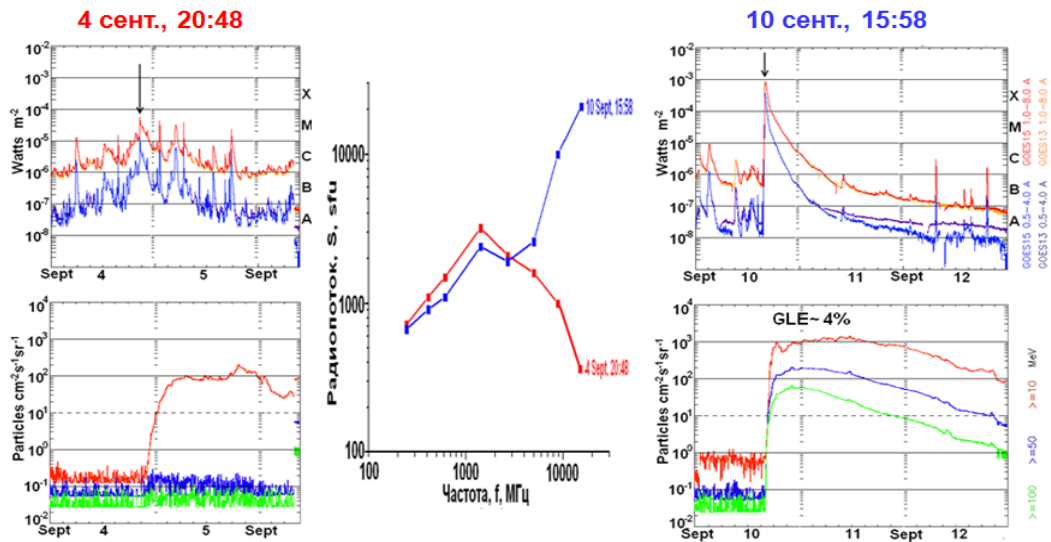


Рис. 1. Временные профили рентгеновских вспышек (каналы 0,5–4, 1–8 Å) и потоков протонов ($E > 10, 50, 100$ МэВ) у Земли для постэруптивного события 4 сент. 2017 г. с мягким радио и энергетическим спектром (левый ряд) и для мощной длительной вспышки 10 сент. 2017 г. (правый ряд) с жестким радио и энергетическим спектром протонов. В центре - частотный спектр микроволновых всплесков этих двух вспышек.

Сравним две наиболее сильно различающиеся вспышки (Рис. 1). Главной отличительной особенностью вспышки 4 сент. является мягкий радиоспектр с максимальным потоком в интересующем нас диапазоне $S_3 \sim 2000$ sfu ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ Вт м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$) на $f_m \sim 3$ ГГц (фактически частотный спектр достигает пика даже в дециметровом диапазоне). Этим определяются основные оценочные и наблюдаемые характеристики потока протонов: мягкий энергетический спектр с показателем $\gamma \sim 2,7$ (оценка) и $\gamma \sim 3,0$ (наблюдения). Радиоданные дают также правильную оценку масштаба СПС с $J_{10}(>10 \text{ МэВ})$ в диапазоне $10 - 250$ pfu ($1 \text{ pfu} = 1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$) при наблюдаемой интенсивности $J_{10} \sim 100$ pfu. Указанные характеристики радиовсплеска дают основания предполагать, что в данной вспышке преобладало постэруптивное энерговыделение и ускорение частиц.

Прилиम्бовая вспышка 10 сент. обладала самым мощным радиовсплеском с $S_{15} \sim 21000$ sfu при резком росте радиопотока вплоть до $f_m \sim 15$ ГГц и, следовательно, наиболее жестким частотным спектром. Соответственно, оценки по радиоданным приводят к значительной интенсивности потока протонов $J_{10} \sim 2600$ pfu и расчётному показателю энергетического спектра при энергиях десятки МэВ в диапазоне $\gamma \sim 1,2 - 1,7$, близкому к наблюдаемому $\gamma \sim 1,4$. Существенно, что такие оценочные параметры соответствуют не только наблюдаемому масштабу и спектру СПС, но также и зарегистрированному в данном случае наземному возрастанию (GLE) потока космических лучей.

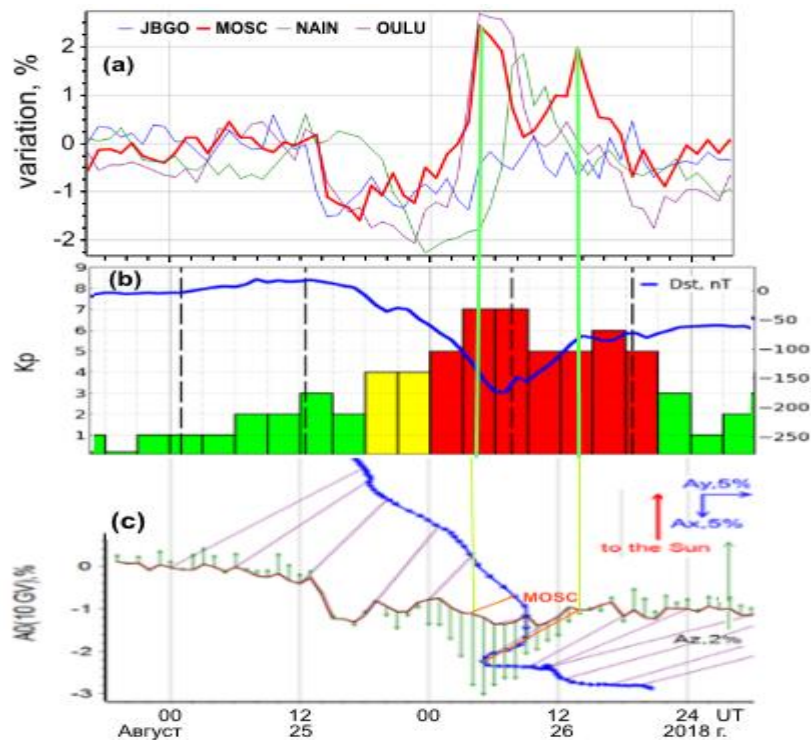


Рис. 2. Возмущения космической погоды от эрупции волокна 20 авг. 2018 г. (а) Форбуш-понижение с двумя положительными всплесками. (б) Геомагнитная буря с $Dst \approx -174$ нТл. (с) Векторная диаграмма и вертикальные стрелки, характеризующие экваториальную и северо-южную анизотропию космических лучей.

2. 26 августа 2018 г. неожиданно произошла интенсивная геомагнитная буря (ГМБ) класса G3. Её Dst индекс достиг -174 нТл, что соответствует третьей по интенсивности ГМБ в цикле. Прогнозисты фактически пропустили солнечный источник этой бури и не предсказали её. Однако, анализ показал, что она была инициирована двумя эрупциями волокна и волоконного канала, локализованных в центральном секторе северной половины солнечного диска между северо-восточной и юго-западной корональными дырами. Эрупции наблюдались 20 августа с интервалом около 8 часов в линии H-альфа, а также с помощью ультрафиолетового телескопа SDO/AIA и сопровождались характерными для эрупций двумя протяженными светящимися лентами, расходящимися со временем, и довольно крупными диммингами. При этом не было зафиксировано ни заметного вспышечного повышения потока мягкого рентгена, ни радиовсплесков.

За обеими эрупциями последовали довольно слабые, но заметные корональные выбросы (CMEs), которые наблюдались как гало на коронографе SOHO/LASCO и как направленные к Земле транзиенты на коронографе STEREO-A/COR2, находившегося по углом 108° . Во внутренней короне скорость CMEs была довольно низкой порядка 200–300 км/с. По этой причине соответствующие межпланетные транзиенты (ICMEs) переносились фоновым солнечным ветром, по-видимому, без существенного расширения

и достигли Земли только 25 августа. Результирующий транзиент принёс к земной магнитосфере неожиданно сильное поле $B_t \approx 20$ нТл с преимущественно южной Vz компонентой почти такой же напряженности (Рис. 2).

Геокосмическое возмущение проявило себя также в форме пекулярного Форбуш-понижения (ФП) потока галактических космических лучей (ГКЛ). Его амплитуда, соответствующая жесткости 10 ГВ и определенная на основе данных мировой сети нейтронных мониторов (НМ) по методу глобальной съемки, была $\sim 1.4\%$, что довольно мало для зафиксированной ГМБ класса G3.

На некоторых европейских НМ на фоне ФП наблюдался заметный положительный всплеск потока ГКЛ с подъёмом над фоновой скоростью счёта перед ФП до 3%. В частности, на НМ ИЗМИРАН (MOSC) этот всплеск состоял из двух похожих импульсов с интенсивностью 2,5% и 2,0%, длительностью 4–7 часов и примерно таким же интервалом между ними. В данном событии имела место аномально высокая азимутальная ($A_{xy} \approx 2.9\%$) и северо-южная ($A_{z} \approx 2.35\%$) анизотропия ГКЛ. Из Рис. 2 видно, что на НМ ИЗМИРАН 1-ый всплеск наблюдался вблизи пика ГМБ и максимума обеих составляющих анизотропии, а 2-ой всплеск происходил во время наиболее значительных изменений направления азимутальной анизотропии. Отсюда следует, что положительные всплески скорости обусловлены, в основном, анизотропией ГКЛ, хотя вариации жёсткости геомагнитного обрезания тоже внесли свой вклад.

Рассмотренные здесь выдающиеся события, связанные с сильнейшим всплеском вспышечной активности 4–10 сент. 2017 г., а также специфические солнечные эрупции и геокосмические возмущения 20–26 авг. 2018 г., расширяют наши представления о том, какие мощные и пекулярные явления могут происходить в глубоком минимуме солнечного цикла.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 17-02-00308, 17-02-00508) и РНФ (грант 15-12-20001).

Литература

1. Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. Результаты количественной диагностики протонных вспышек по данным о радиовсплесках за контрольный интервал 1970–1977 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 20. С. 385–393. 1980.
2. Черток И.М. Оценки показателя энергетического спектра протонов по данным о солнечных микроволновых всплесках // Геомагн. и аэрномия. Т. 22. С. 182–186. 1982.
3. Черток И.М. Диагностический анализ солнечных протонных вспышек сентября 2017 г. по их радиовсплескам // Геомагн. и аэрномия. Т. 58. № 4. 2018.
4. Abunin A.A., Abunina M.A., Belov A.V., Chertok I.M. Peculiar solar sources and geospace disturbances on 20–26 August 2018 // Space Weather, in press, 2019.