

АНАЛИЗ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ, ВЫЗВАВШИХ СОБЫТИЯ ТИПА GROUND LEVEL ENHANCEMENT

Сулейманова Р.А.¹, Мирошниченко Л.И.², Абраменко В.И.¹

¹*Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия*

²*Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн имени
Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия*

ANALYSIS OF ACTIVE REGIONS THAT CAUSED GROUND LEVEL ENHANCEMENT EVENTS

Suleymanova R.A.¹, Miroshnichenko L.I.², Abramenko V.I.¹

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

²*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-309-312>

Particles accelerated during flares can cause abrupt increases in the intensity of solar cosmic rays (GLE events) registered on the Earth. Such powerful explosions have sources in the Sun, active regions (ARs). In this paper, the identification of GLE events observed in 1942–2021 with ARs was carried out. For the verification of the identification, for data since 1970 to 2017, a comparison of the found ARs number with that from the catalogues of solar particles events of 1970–2017 was carried out. The identified ARs were classified following the magneto-morphological classification. The average total unsigned magnetic flux of ARs that caused GLE events in 1997–2021 was also calculated. It is shown the majority of GLE-related ARs are complex irregular ARs with high magnetic flux.

Ускоренные частицы (солнечные космические лучи) во время вспышек могут обладать энергиями от нескольких десятков КэВ до нескольких сотен МэВ, т.е. создавать солнечные протонные события (СПС). Если энергия частиц больше 500 МэВ, то возникает событие типа Ground Level Enhancement (GLE) [11, 12], при котором наземные детекторы регистрируют резкое возрастание интенсивности космических лучей. Подобные события происходят редко, тем не менее, вносят особый вклад в вопрос солнечно-земных связей. Одним из вопросов является отождествление событий GLE с источником на Солнце: вспышками, а также с активными областями (АО), которые эти вспышки образуют. С 1955 года ведутся каталоги СПС, где проводится сопоставление СПС с номерами АО. 1955–1979: сопоставление СПС с данными обсерватории Mc Math-Hulbert (номер кальциевого флоккула АО [5, 10]). 1970–1986: сопоставление СПС с данными обсерватории Meudon [5, 8]. 1970–1979: Mount Wilson [5]. 1982 – настоящее время: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [1, 8, 15, 19]. Такая разнообразная нумерация является не совсем удобной для анализа АО, а также не покрывает весь временной ряд (начало наблюдений GLE событий – это 1942 г. [14]). В то же время, имеется каталог с

номерах АО по данным Гринвичской обсерватории (1874–1976 гг., <https://www.ukssdc.ac.uk>, [7]), который покрывает непрерывный интервал временного ряда, вплоть до введения нумерации NOAA (с 1974 г., solarcyclescience.com/activeregions). В данной работе мы попытались упорядочить отождествление номеров АО, связанных с GLE событиями.

Данные о GLE событиях 1998–2021 гг. были взяты из международной базы данных нейтронных мониторов (Neutron Monitor Database, NMBD, <https://www.nmdb.eu/>), для данных 1970–1998 гг. использовалась информация с Solar Geophysical Data (SGD, <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/sgd.html>), для данных 1955–1969 использовался каталог СПС [10], для данных 1942–1949 гг. использовалась информация с [11].

Для отождествления АО с GLE событиями мы использовали следующие данные:

- Зарисовки и магнитограммы, предоставленные Дебреценской обсерваторией (DPD, fenyi.solarobs.csfk.mta.hu/DPD/, [7,13])
- Зарисовки и измерения магнитных полей солнечных пятен, предоставленные Крымской астрофизической обсерваторией РАН (<https://sun.crao.ru/observations/sunspots-magnetic-field>)
- Магнитограммы магнитного поля по лучу зрения полного диска Солнца в спектральной линии Ni I 6768 Å с разрешением 4", полученные инструментом Michelson Doppler Imager (MDI) космического аппарата Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) [17]
- Магнитограммы магнитного поля по лучу зрения в спектральной линии Fe I 6173.3 Å с разрешением 1" (Space-weather HMI Active Region Patches), полученные инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) космического аппарата Solar Dynamic Observatory (SDO) [18].

Отождествление происходило следующим образом. На дату GLE события открывалась зарисовка и/или магнитограмма полного диска Солнца. Считая, что координаты АО и вспышки отличаются не сильно, мы искали нужную нам АО. В том случае, если вспышка произошла за лимбом, рассматривались предыдущие/последующие дни, считая, что широта АО изменялась не сильно, а по долготе она проходила примерно 13.5° в день. Таким образом, из 73 GLE событий, наблюдавшихся с 1942 г по наше время, было отождествлено с АО 71 событие. Для двух GLE событий (GLE 16–17) АО не удалось найти.

Была произведена проверка получившихся данных. Мы сравнили найденные АО с данными, содержащимися в каталогах СПС за 1970–2017 гг. следующим образом. Используя [5], были сравнены номера АО по каталогу обсерватории Mount Wilson с полученными номерами АО по каталогу Гринвичской обсерватории. Используя [8, 19, 1, 15], сравнивались номера АО в системе NOAA. Всего было сопоставлено 51 АО, из них 47 совпали с данными по нашему списку. Для четырех АО (GLE 33–36) сравнение было невозможным, так как для них не было найдено номера АО по

Mount Wilson. Из проведенного сравнения можно утверждать, что отождествление АО с 1970 по 2017 гг. было проведено нами с достаточной точностью, поэтому есть основания полагать, что и остальные отождествления (за 1942–1969 гг.) являются надежными.

Каждой АО присваивался класс в соответствии с магнитоморфологической классификацией (ММК) [2–4]. Кратко ее суть заключается в следующем. Все АО делятся на группы. Регулярные АО (класс А), которые выполняют эмпирические законы (закон полярности Хейла, закон Джоя, правило доминирования лидирующего пятна), и, возможно, были созданы глобальным динамо-процессом. Нерегулярные АО (класс В), не подчиняющиеся эмпирическим законам, на формирование которых в разной степени повлияла турбулентность конвективной зоны. Униполярные АО выделяются в отдельный класс U. Среди 71 проклассифицированной АО были найдены: одна регулярная АО, одна униполярная АО, остальные 67 были проклассифицированы как нерегулярные АО.

Для АО, наблюдавшихся с 1997 по 2021 гг. был посчитан полный беззнаковый магнитный поток по методу, представленному в работе [3]. Полученное значение было сопоставлено с таким же средним потоком большего числа АО, наблюдавшихся в 23–24 солнечных циклах и представленных в каталоге ММК [3, 4]. Получено, что средние потоки АО, вызвавших GLE события, в 6 раз больше ($5.92 \cdot 10^{22}$ Мх против $0.92 \cdot 10^{22}$ Мх), чем средний поток регулярных АО, и в 2 раза больше ($5.92 \cdot 10^{22}$ Мх против $2.62 \cdot 10^{22}$ Мх) среднего потока нерегулярных АО.

Суммируя, можно заключить, что в основном АО, вызывающие события типа GLE, являются сложными, нерегулярными АО с большими потоками. Возможна некоторая генетическая связь этих активных областей с другими группами сложных АО, например с Super Active Regions (SARs) [6, 9], или, например, с Rogue active regions [16]. Изучение таких групп АО может дать информацию о нелинейностях глобального динамо-процесса на Солнце.

Авторы благодарны В.Н. Ишкову за обсуждение и предоставление необходимой информации.

Литература

1. *Логачёв Ю. И., Базилевская Г. А., Вашенюк Э. В. и др.* Каталог солнечных протонных событий 23-го цикла солнечной активности (1996–2008 гг.) // ESDBrepositary. ГЦ РАН. 2016. Москва
2. *Abramenko V.I.* Signature of the turbulent component of the solar dynamo on active region scales and its association with flaring activity // MNRAS. 2021. Vol. 507. No. 3, pp. 3698–3706
3. *Abramenko V.I., Suleymanova R.A., Zhukova A.V.* Magnetic fluxes of solar active regions of different magneto-morphological classes – I. Cyclic variations // MNRAS. 2023. Vol. 518. Iss.3, pp. 4746–4754

4. *Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S.* Contributions from Different-Type Active Regions Into the Total Solar Unsigned Magnetic Flux // *Geomagn. Aeron.* 2018. Vol. 58, pp. 1159–1169
5. *Akinyan S.T., Bazilevskaya G.A., Ishkov V.N. et al.* Catalog of solar proton events 1970–1979 // *ESDB repository*. GC RAS. 1983. Moscow
6. *Bai T.* Distribution of flares on the Sun: superactive regions and active zones of 1980–1985 // *ApJ*. 1987. Vol. 314, pp. 795–807
7. *Baranyi T., Györi L., Ludmány A.* On-line Tools for Solar Data Compiled at the Debrecen Observatory and Their Extensions with the Greenwich Sunspot Data // *Solar Physics*. 2016. Vol. 291, pp. 3081–3102
8. *Bazilevskaya G.A., Vashenyuk E.V., Ishkov V.N. et al.* Solar Proton Events Catalogue 1980–1986. Plots of the time profiles and energetic spectra of protons, synoptic charts and schemes of sunspot groups // *ESDB repository*. GC RAS. 1990. Moscow
9. *Chen A.Q., Wang J.X., Li J.W., et al.* Statistical properties of superactive regions during solar cycles 19–23 // *A&A*. 2011. Vol. 534, A47
10. *Dodson H.W., Hedeman E.R., Kreplin R.W. et al.* Catalog of solar particles events, 1955–1969 // *Astrophysics and Space Science Library* (Dordrecht (Netherlands): D. Reidel). 1975. Vol. 49.
11. *Duggal S.P.* Relativistic solar cosmic rays // *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 1979. Vol. 17, pp. 1021–1058
12. *Forbush S.E.* Three unusual cosmic-ray increases possibly due to charged particles from the Sun // *Physical Review*. 1946. Vol. 70, pp. 771–772
13. *Györi L., Ludmány A., Baranyi T.* Comparative analysis of Debrecen sunspot catalogues // *MNRAS*. 2017. Vol. 465, No. 2, pp. 1259–1273
14. *Lange I., Forbush S.E.* Note on the Effect on Cosmic-Ray Intensity of the Magnetic Storm of March 1, 1942 // *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity* (Journal of Geophysical Research. 1942. V. 47. No. 2, pp. 185
15. *Logachev Yu.I., Bazilevskaya G.A., Vlasova N.A.* Catalog of solar proton events in the 24th cycle of solar activity (2009–2019) // *ESDB repository*. GC RAS. 2022. Moscow
16. *Nagy M., Lemerle A., Labonville F. et al.* The Effect of "Rogue" Active Regions on the Solar Cycle // *Solar Physics*. 2017. Vol. 292. No. 11, pp. 167
17. *Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I. et al.* The Solar Oscillations Investigation - Michelson Doppler Imager // *Solar Physics*. 1995. Vol. 162, pp. 129–188
18. *Schou J., Scherrer P.H., Bush R.I. et al.* Design and Ground Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Physics*. 2012. Vol. 275, pp. 229–259
19. *Sladkova A.I., Bazilevskaya G.A., Ishkov V.N. et al.* Catalogue of Solar Proton Events 1987–1996 // *ESDB repository*. GC RAS. 1998 Moscow