

1. Струминский А.Б., Садовский А.М., Ожередов В.А. (ИКИ РАН) и Григорьева И.Ю. (ГАО РАН), Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А. (ИЗМИРАН)

2. Цикл работ 2024-2025 «Среднее электрическое поле ускорения протонов в солнечных вспышках»

3. Ссылки на публикации

- [1] *Струминский А.Б., Садовский А. М., Григорьева И. Ю.* Расширение источника мягкого рентгеновского излучения и “магнитная детонация” в солнечных вспышках // *Письма в АЖ*, 2023, том 49, № 11, с. 806–818, DOI: 10.31857/S0320010823110086
- [2] *Sadovski A. M., Struminskiy A. B., and Grigorieva I. Yu.* Acceleration Rates and Energies of the First Protons Arriving at Earth // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2025, Vol. 89, No. 6, pp. 835–838 DOI: 10.1134/S1062873825711250
- [3] *Струминский А.Б., Садовский А.М., Григорьева И.Ю.* Источники солнечных протонов в событиях 24–25 февраля и 16–17 июля 2023 года // *Космические Исследования (2024) т. 62, № 2, с. 188–200.* DOI: 10.31857/S0023420624020052
- [4] *Struminsky A.B., Ozheredov V.A., Sadovski A.M., Shlyk N.S., Belov A.V., Abunina M.A., Grigorieva I.Yu.* Evidence of prolonged acceleration of solar protons in average electric fields less than $4 \cdot 10^{-4}$ V/cm // *Advances in Space Research xxx (xxxx) xxx* <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.05.003>

4. Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность

Проблема происхождения солнечных космических лучей (СКЛ) в настоящее время не решена в полной мере. События в относительно слабых циклах — 24-м и 25-м — могут стать «Roseta stone» для ее решения. Выбор механизма и места ускорения СКЛ (солнечных электронов и протонов) усложняется отсутствием прямых наблюдательных данных, которые свидетельствовали бы об ускорении, т.е. увеличении средней кинетической энергии электронов и протонов во времени.

С одной стороны, оценки электрических полей в несколько В/см и больше, возникающих при пересоединении магнитного поля в области вспышки, не исключают возможности быстрого ускорения электронов до 100 кэВ и протонов ~200 МэВ, практически мгновенного по сравнению с рассматриваемыми экспериментальными возможностями. С другой стороны, наблюдаемые задержки НХР излучения соответствуют временам ускорения электронов до 100 кэВ (от десятков до сотен миллисекунд), тогда как времена ускорения протонов в m_p/m_e больше (единицы минут и более). Характерные времена ускорения протонов не противоречат появлению первых ускоренных протонов на орбите Земли через несколько минут и более после регистрации НХР излучения. Наблюдения, по всей видимости, показывают, что реализуются значительно меньшие напряженности поля, чем единицы В/см, а именно величины порядка 10^{-4} – 10^{-5} В/см.

5. Конкретная решаемая в работе задача и ее значение

По наблюдениям момента первой регистрации солнечных протонов (СП) в знаменательных солнечных протонных событиях (СПС) 23–25-циклов инструментами с различными энергетическими диапазонами сделаны оценки среднего ускоряющего поля и необходимой длительности стохастического процесса ускорения в солнечных вспышках. Мы обращаем внимание на то, что энергия первых пришедших на орбиту Земли СП зависит от

темпа ускорения (средней величины ускоряющего поля) и длительности всего процесса их ускорения. При некотором наборе параметров ускорения возможно, что первыми на орбиту Земли приходят СП меньших энергий, а СП больших энергий позже.

Определение темпа ускорения протонов (средней величины ускоряющего электрического поля) по наблюдениям солнечного гамма-излучения и СП в гелиосфере имеет фундаментальное значение для плазменной астрофизики, так как ставит наблюдательные ограничения на процессы ускорения в космической (не лабораторной) плазме.

6. Используемый подход, его новизна и оригинальность

Мы используем данные (<https://isdc.unige.ch/~savchenk/spiacs-online/spiacspnlc.pl>) детектора ACS SPI (the AntiCoincidence Shield of the SPectrometer on the INTEGRAL), который регистрирует первичные и вторичные НХР фотоны. Вторичные НХР фотоны рождаются в теле детектора от протонов галактических космических лучей (ГКЛ) и СКЛ. Детектор ACS SPI был отличным инструментом для изучения временных связей между солнечными НХР вспышками и последующими возрастаниями интенсивности СП. Начало значимого возрастания темпа счета ACS SPI во время или после солнечного НХР всплеска может рассматриваться, как момент первого прихода СП с энергией меньше 430 МэВ (энергия атмосферного обрезания) на орбиту Земли. Темп счета ACS SPI в минимуме солнечной активности ~ 6800 отсчетов за 50 мс и соответствует потоку протонов ГКЛ >100 МэВ ~0.1 pfu, т. е. значимыми являются потоки $3.5 \cdot 10^{-5}$ pfu >100 МэВ. Стандартных детекторов, регистрирующих потоки протонов >100 МэВ с такой точностью, нет.

Анализируя СПС события конца 23-го цикла солнечной активности Струминский и Зимовец (Struminsky A.B., Zimovets I.V., 2009. Time of arrival of the first relativistic solar protons to the Earth. Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 73 (3), 315–318) обратили внимание на факт, что в некоторых наземных возрастаниях интенсивности КЛ (Ground level enhancements — GLE, возрастание темпа счета наблюдается на 10–15 мин раньше, чем на наземных нейтронных мониторах (НМ)). Однако есть GLE события с противоположным порядком регистрации. Более 10 лет этот факт считался наблюдательным курьезом. Традиционно, именно регистрация протонного сигнала НМ рассматривалась, как момент первого прихода протонов на Землю, что служило основанием для выпуска предупреждения (alert) о радиационной опасности в космосе и на Земле (например, см. Mavromichalaki H., Paschalis P., Gerontidou M., Papailiou M.-C. et al., 2022. The updated version of the A.Ne.Mo.S. GLE alert system: the case of the ground-level enhancement GLE73 on 28 October 2021. Universe 8. 378). Отметим, что согласно новым определениям (см. Poluianov, S.V., Usoskin, I.G., Mischev, A.L., Shea, M.A., Smart, D.F., 2017. GLE and sub-GLE redefinition in the light of high-altitude polar neutron monitors. Sol. Phys. 292, 176) GLE событие должно регистрироваться как минимум двумя НМ, один из которых не высокогорный, а subGLE - только полярными и высокогорными НМ.

В работе [4] детально сравнивались времена первой регистрации СП сигнала ACS SPI и НМ-ми с различной энергией атмосферного и геомагнитного обрезания спектра протонов (минимальной регистрируемой энергией протонов). На примере некоторых GLE и subGLE событий GLE 23-го, 24-го и 25-го циклов проверялась гипотеза о том, что у каждой протонной вспышки существует начальная импульсная фаза — источник «раннего» и слабого протонного возрастания [3, 4], которое может оказаться как видимым так и невидимым в зависимости от фоновых условий. Эта идея основана на сравнении СПС 28 октября 2021 (GLE73) с «ранним» и слабым протонным возрастанием от вспышки 16 июля 2023 (M4.0) в [3]. Примерами других «ранних» и слабых протонных возрастаний, зарегистрированных ACS SPI, являются события, связанные с импульсными вспышками 14 мая (X8.7) и 8 декабря (X2.2) 2024 [4]. Эффективное электрическое поле (темп ускорения протонов) оценивалось по разнице времени между началом НХР излучения >100 кэВ и началом возрастания СП по данным ACS SPI, а также сетью нейтронных мониторов в случаях GLE и subGLE событий.

7. Полученные результаты и их значимость

- В [1] предложена гипотеза “магнитной детонации”, согласно которой эруптивные вспышки и КВМ представляют собой результат множественного магнитного пересоединения от хромосферы до верхней короны при расширении плазменных структур с замороженным сильным магнитным полем в область слабого. Показано, что модель может реализоваться в длительных вспышках при наличии КВМ и ускорения частиц, но не реализуется в коротких импульсных вспышках.
- В работах [2–4] сделаны оценки темпа ускорения протонов (доступное среднее электрическое поле) в предположении, что доступное время для их ускорения равно времени между началом рентгеновского излучения >100 кэВ и моментом первой регистрации протонов с энергией E_p минус время распространения протонов E_p до 1 а.е. Наши оценки противоречат распространенным представлениям о практически мгновенном ускорении протонов в электрических полях эруптивных вспышек с напряженностями более единиц В/см.
- Ускорение протонов >100 МэВ происходит в горячей ($T > 10$ МК) и разряженной плазме ($n_e < 2.5 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$), в которой напряженность супер драйсеровских полей менее $4 \cdot 10^{-4}$ В/см. Ускорительный механизм, по всей видимости, представляет собой множественное пересоединение [2] в процессе «магнитной детонации» в эруптивных вспышках [1]. Если ускорение происходит в эффективных электрических полях $\mathcal{E} < 1.8 \cdot 10^{-4}$ В/см ($A = 5.3$ МВ/с), то должна наблюдаться обратная дисперсия прихода первых протонов – меньшие энергии приходят раньше, чем больших.
- Эруптивные вспышки (протонные и не протонные) могут быть классифицированы по доступному электрическому полю (моментам первого наблюдения солнечного рентгеновского излучения > 100 кэВ и первого прихода солнечных протонов) и доступному времени для ускорения протонов > 100 МэВ (длительности солнечного нетеплового излучения электронов 100 кэВ). Очевидно, что в протонных вспышках достаточно времени и напряженности поля для ускорения протонов >100 МэВ (>450 МэВ в случае GLE событий), а в не протонных вспышках недостаточно времени и/или напряженности поля для ускорения протонов > 30 МэВ [2].
- Большинство СП, ответственных за GLE события 25-го цикла (с 73-го по 76-ое по состоянию на июнь 2025) ускорялись в эффективных электрических полях менее $1.0 \cdot 10^{-4}$ В/см. Протоны с жесткостями более > 1650 МВ ускорены не были. В рассмотренных GLE событиях 23-го и 24-го циклов, протоны ускорялись в электрических полях более $1.0 \cdot 10^{-4}$ В/см, а GLE события 25-го цикла напоминают subGLE события 24-го цикла.
- Так как большее электрическое поле соответствует большей плотности вещества, а плазменные неустойчивости должны развиваться при сравнимых плазменных β , то плотность магнитной энергии в короне в 25-ом цикле должна быть меньше, чем в 24-ом цикле.