

DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.012

ПУЛЬСИРУЮЩИЕ ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ И ВЫСЫПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ «ЛОМОНОСОВ» И «МЕТЕОР-М2»

П.А. Климов¹, Г.И. Антонюк^{1,2}, В.В. Бенгин¹, А.Р. Иванова^{1,2}, В.В. Калегаев¹,
К.Ф. Сигаева^{1,2*}, Н.А. Власова¹, И.А. Золотарев^{1,2}

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
МГУ им. М.В. Ломоносова, 119234, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
119234, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

*E-mail: sigaeva.kf15@physics.msu.ru

Аннотация. Представлены результаты анализа одновременной регистрации пульсаций ультрафиолетового (УФ) излучения атмосферы Земли телескопом ТУС на спутнике Ломоносов и потоков заряженных частиц на спутниках *Метеор-М2* и *Ломоносов* с целью определения источников пульсаций УФ излучения. Показано, что пульсации наблюдаются во время геомагнитной активности, по данным приборов спутников *Метеор-М2* и *Ломоносов* преимущественно в области внешнего радиационного пояса Земли вблизи максимумов потоков электронов с энергиями >100 кэВ и >1 МэВ, соответственно, а также в районе высыпаний потоков электронов с энергией >100 кэВ.

Введение

Пульсирующие полярные сияния (ППС) являются одним из проявлений авроральной активности на высоких широтах в атмосфере Земли. Это – квазипериодические модуляции интенсивности свечения амплитудой около 10% относительно максимальной яркости свечения и с частотами 2-10 Гц, представленного в виде «колонн» при общем усилении яркости свечения дискретных аврор. Ширина колонны составляет порядка нескольких километров (1-12 км), а высота – более 10-40 км [1]. Характерное расположение ППС – полуночно-утренний сектор MLT на экваториальной кромке аврорального овала, для более низких частот пульсаций характерно расположение на более низких широтах [2].

ППС разделяют, например, на основе стабильности формы и пространственного размера пульсирующих пятен на три типа: аморфные ППС, пятнистые ППС и пятнистые полярные сияния [3]. Аморфные ППС являются самими быстро развивающимися из всех трех типов, пятнистые ППС и пятнистые полярные сияния – относительно стабильные структуры, которые могут наблюдаться в течение десятков минут. Аморфные ППС являются наиболее часто встречающимся типом авроры и преимущественно возникают до полуночи, в то время как пятнистые ППС и пятнистые полярные сияния возникают в секторе позднего утра [3]. Важно отметить, что разные типы ППС проецируются в разные области магнитосферы: если пятнистые и пульсирующие пятнистые относятся к внутренней магнитосфере (4-9 R_E), то аморфные – к внешней, до 15R_E.

ППС чаще всего наблюдают при помощи наземных камер всего неба, регистрирующих события в оптическом диапазоне (например, сеть THEMIS [4] и камеры Полярного Геофизического института [5]), в то время как в настоящей работе предлагается анализ пульсирующих сияний, зарегистрированных в УФ диапазоне при помощи аппаратуры на искусственном спутнике Земли.

Инструменты

Детектор «Трековая установка» (ТУС) был установлен на борту спутника *Ломоносов* и выведен в апреле 2016 года на солнечно-синхронную орбиту (наклонение 97.3°, высота около 500 км) [6]. Срок активного функционирования прибора ТУС на орбите составил около полутора лет. Прибор представляет собой высокочувствительный телескоп-рефлектор, направленный в нади́р. Телескоп – зеркало-концентратор френелевского типа площадью около 2 м², установленный в фокальной плоскости зеркала фотоприемника. Фотоприемник – высокочувствительная матрица из 256 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) Hamamatsu R1463. Каждый пиксель имеет бленду черного цвета, защищающую от боковой засветки, и УФ фильтр (УФС1) диаметром 13 мм и толщиной 2.5 мм. Диапазон регистрации длин волн: 240 нм – 400 нм, нижняя граница диапазона обеспечивается квантовой эффективностью ФЭУ, а верхняя – использованием УФ

фильтра. Поле зрения одного пикселя 10 мрад, что соответствует площадке 5×5 км на поверхности Земли, а полное поле зрения телескопа составляет 80×80 км. Электроника детектора обеспечивает 4 режима работы с различным временным разрешением (0.8 мкс, 25.6 мкс, 0.4 мс и 6.6 мс), предназначенных для регистрации событий различной природы в атмосфере Земли. Пульсации УФ свечения в полярной области, описанные в настоящей работе, были зарегистрированы в режиме с временным разрешением 6.6 мс.

Для определения источника наблюдаемых телескопом ТУС УФ пульсаций проведен сравнительный анализ с экспериментальными данными по регистрации частиц детекторами на спутнике *Метеор-М2* [7] и детектором ДЭПРОН (Дозиметр Электронов, ПРОтонов, Нейтронов), установленным на спутнике *Ломоносов*. Спутник *Метеор-М2* был запущен на солнечно-синхронную орбиту (наклонение – 98°, высота – 825 км) в 2014 году, и срок его активного существования составил 5 лет. Главной задачей космического аппарата было наблюдение атмосферы и поверхности Земли с целью анализа гидрометеорологической и гелиогеофизической информации в планетарном масштабе. В числе научной аппаратуры спутника имелась система регистрации частиц различной энергии, позволявшая определять направления потоков частиц, тип (протоны или электроны) и энергии частиц. Детекторы системы позволяют разделить потоки в двух направлениях: часть детекторов направлена в зенит, часть – вдоль вектора тангенциальной скорости. Также система позволяла определить энергии частиц в диапазоне от нескольких кэВ до нескольких МэВ для электронов и от сотен кэВ до сотен МэВ для протонов. Данные детекторов спутника *Метеор-М2* представлены на сайте Центра анализа космической погоды НИИЯФ МГУ (<https://swx.sinp.msu.ru/index.php>).

Детектор ДЭПРОН предназначен для регистрации на орбите Земли высокоэнергичных частиц космического излучения и для измерения поглощенных доз от них. Прибор представляет собой систему из двух кремниевых полупроводниковых детекторов и двух гелиевых газоразрядных счетчиков тепловых нейтронов. Полупроводниковые детекторы работают в амплитудно-импульсном режиме, что позволяет регистрировать поток и мощность дозы заряженных частиц, попадающих в детектор [8]. Порог регистрации частиц у данного прибора составляет около 1 МэВ.

Результаты и обсуждение

В ходе работы детектора ТУС на орбите было зарегистрировано около 10000 событий в режиме с временным разрешением 6.6 мс. Периоды работы аппаратуры в этом режиме приведены в первом столбце таблицы 1. Периоды соответствуют полярному дню в южном полушарии, поэтому регистрация, требующая низкой фоновой засветки, проводилась только в северных широтах. Среди всех проанализированных событий обнаружено 66 событий с необычными УФ пульсациями, которые оказались расположены вдоль экваториальной границы аврорального овала в диапазоне широт от 52 с.ш. до 71 с.ш. [9]. Распределение количества событий по периодам измерений показано в таблице 1.

Таблица 1. Время работы и количество событий в режиме с временным разрешением 6.6 мс.

Даты	Общее количество событий	Количество событий с пульсациями
26.12.2016-10.01.2017	3501	32
28.02.2017-21.03.2017	4368	2
08.11.2017-15.11.2017	2225	32

Примеры зарегистрированных событий приведены в нескольких работах (см., например, [9,10]).

Характерными чертами наблюдаемых событий являются:

- Наличие вариаций интенсивности свечения: амплитуда вариации составляет 10-20% относительно среднего уровня яркости аврорального свечения. Частота наблюдаемых пульсаций находится в диапазоне от 1 до 10 Гц;
- В большинстве случаев схожие временные структуры пульсаций наблюдаются в нескольких близко расположенных на матрице детектора пикселях, что означает, что размер области свечения не превышает порядка нескольких пикселей, т.е. 10-15 км;
- Максимум распределения событий по *L* оболочкам находится от 4*L* до 6.5*L*, где, как правило, регистрируется экваториальная кромка аврорального овала и полярная граница внешнего радиационного пояса Земли.

Два основных периода наблюдения пульсаций (январь и ноябрь 2017 г.) совпали с фазой восстановления умеренной геомагнитной бури (*SYM/H* индекс не превышает значения -70 нТл), при этом в течение нескольких дней наблюдалась высокая суббуревая активность. Такие периоды, когда в течение двух и более

дней значение AE-индекса не падает менее 200 нТл, а пиковые значения доходят до 1000 нТл, получили название High-Intensity, Long-Duration, Continuous AE Activity (HILDCAA) Events [11]. Во время этих событий наблюдается активная генерация хоровых волн, которая приводит к эффективному ускорению магнитосферных электронов вплоть до релятивистских энергий.

В качестве одновременных наблюдений детектором ТУС и приборами спутника *Метеор-М2* были выбраны моменты, когда *Метеор-М2* находился на той же L-оболочке, что и спутник *Ломоносов*, в пределах получаса полета от него и с близкими значениями MLT. Всего было обнаружено 18 таких совместных наблюдений. В качестве примера на рис. 1 приведены результаты наблюдений 01.01.2017. Оранжевая и голубая линии отображают профили возрастания интенсивности потоков электронов с энергией более 100 кэВ во время пролета спутником *Метеор-М2* внешнего радиационного пояса Земли (РПЗ). Таким образом, может быть определено пространственное положение события, зарегистрированного детектором ТУС, относительно РПЗ. Желтой и серой линиями представлены пространственно-временные профили потоков частиц низких энергий (частиц аврорального овала). Это дает возможность определить положение аврорального овала на момент регистрации события детектором ТУС. На рис. 1 можно видеть, что событие пульсаций (момент отмечен вертикальной розовой линией) было зарегистрировано детектором ТУС на экваториальной кромке аврорального овала и, в то же время, недалеко от максимума потока частиц РПЗ. Интересно, что примерно в это же время наблюдалась изотропизация потоков энергичных частиц в области возрастания в районе $L \sim 5.7$: примерное совпадение величин потоков энергичных электронов по данным двух детекторов, углы зрения которых направлены взаимно-перпендикулярно (DAS4 hrz и DAS4 vrt).

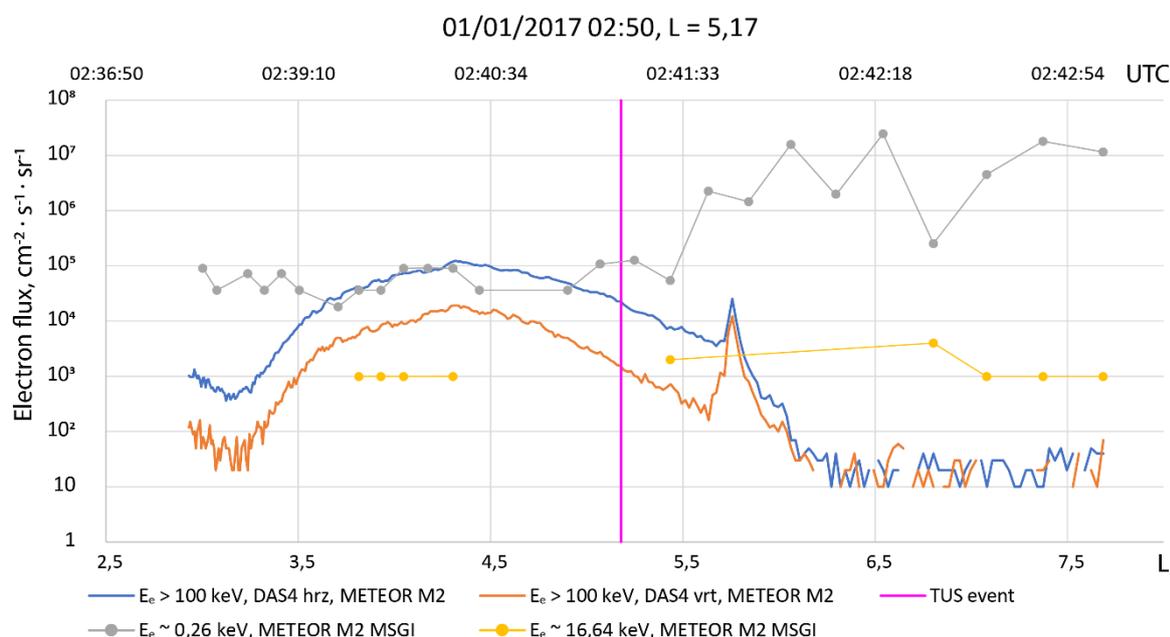


Рисунок 1. Пространственно-временные профили потоков электронов по данным спутника *Метеор-М2* 01.01.2017. Вертикальная розовая линия указывает L-координату регистрации события с пульсациями детектором ТУС в 02:50 UTC того же дня.

Также проведен анализ событий, зарегистрированных детектором ТУС, и экспериментальных данных, полученных детектором ДЭПРОН в эти же интервалы времени. Срок активной работы детектора ДЭПРОН на орбите составил около 7 месяцев (с 5 мая 2016 года по 10 января 2017 года). Пересечение периодов работы детекторов ТУС и ДЭПРОН только частичное. В результате поиска моментов времени одновременной работы обоих приборов было обнаружено 13 промежутков времени, среди которых найдено 3 события, когда происходит регистрация события телескопом ТУС и есть информация с прибора ДЭПРОН, а также с детекторов спутника *Метеор-М2*. На рис. 2 представлено одно из событий, 07.01.2017.

Можно видеть, что события были зарегистрированы в области существенного увеличения потоков как частиц с энергией >100 кэВ (рис. 2а), так и с энергией >1 МэВ (рис. 2б). Неполное соответствие относительного расположения моментов событий, зарегистрированных детектором ТУС, на профилях потоков частиц РПЗ по данным двух спутников *Метеор-М2* и *Ломоносов*, вероятно, может быть обусловлено разницей орбит спутников, а также разницей энергетических порогов детекторов на спутниках, 100 кэВ и 1 МэВ, соответственно.

Из всего вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. УФ пульсации наблюдаются во время длительной геомагнитной активности (события HILDCAA). В такие периоды активно формируются хорвые волны в магнитосфере Земли, которые связаны с активным питч-угловым рассеянием и ускорением электронов до релятивистских энергий.
2. Обнаружено, что во время регистрации пульсаций действительно наблюдаются повышенные потоки энергичных электронов по данным спутников *Метеор-М2* и *Ломоносов*.
3. Во время некоторых событий пульсаций регистрируется изотропизация потоков электронов с энергией >100 кэВ по данным спутника *Метеор-М2*, которая свидетельствует о высыпаниях этих частиц в атмосферу Земли.

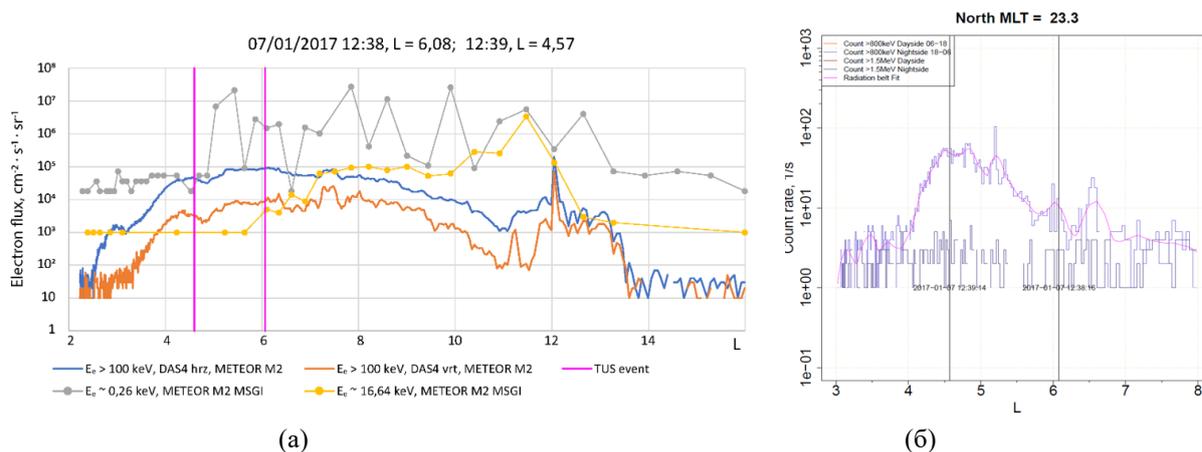


Рисунок 2. Пространственно-временные профили потоков частиц по данным спутника *Метеор-М2* (а) и прибора ДЭПРОН 07.01.2017. Моменты регистрации событий телескопом ТУС в 12:38:16 UTC и в 12:39:14 UTC обозначены вертикальными линиями.

Заключение

Детектор ТУС зарегистрировал в полярной области магнитосферы Земли события с УФ пульсациями. Проведен анализ экспериментальных данных со спутников *Метеор-М2* и *Ломоносов* по измерению потоков электронов с энергией >100 кэВ и >1 МэВ в периоды, включающие моменты времени регистрации УФ пульсаций с целью определения источников этих событий. В качестве одновременных наблюдений детектором ТУС и приборами спутника *Метеор-М2* были выбраны моменты, когда *Метеор-М2* находился на той же L-оболочке, что и спутник *Ломоносов*, в пределах получаса полета от него и с близкими значениями MLT. Обнаружено 18 одновременных наблюдений пульсаций телескопом ТУС с периодами измерений детекторами на спутнике *Метеор-М2* и 13 с измерениями прибором ДЭПРОН на спутнике *Ломоносов*. При анализе данных спутника *Метеор-М2* было выявлено, что в ряде случаев (32% событий) регистрация УФ пульсаций наблюдалась вблизи максимума внешнего электронного РПЗ, где уровень потоков электронов повышен. Также было установлено, что 8% событий пульсаций происходили в более высокоширотной области, в которой наблюдалась изотропизация потоков электронов и их высыпания в атмосферу Земли. Данные детектора ДЭПРОН подтверждают выводы, сделанные в результате анализа данных спутника *Метеор-М2*. Показано, что УФ пульсации могут наблюдаться во время длительной геомагнитной активности (события HILDCAA), когда в магнитосфере Земли формируются хорвые волны.

Анализ УФ свечения атмосферы по данным детектора «ТУС» выполнен за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00010 (<https://rscf.ru/project/22-62-00010/>), анализ потоков заряженных частиц по данным спутника *Метеор-М2* выполнен за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048 (<https://rscf.ru/project/22-62-00048/>). Авторы выражают благодарность коллективу коллаборации *Ломоносов* и Центра анализа космической погоды НИИЯФ МГУ за предоставленные данные, используемые в работе.

Список литературы

- [1] Sakanoi K., Fukunishi H., Kasahara Y. A possible generation mechanism of temporal and spatial structures offlickering aurora // J. Geophys. Res. 2005. vol. 110. A03206
- [2] Duncan C.N., Creutzberg F., Gattinger R.L. et al. Latitudinal and temporal characteristics of pulsating auroras // Can. J. Phys. 1981. vol. 59. 1063-1069.
- [3] Grono E., Donovan E. Differentiating diffuse auroras based on phenomenology // Ann. Geophys. 2018. vol. 36. 891–898. <https://doi.org/10.5194/angeo-36-891-2018>

- [4] Eric Donovan, Stephen Mende, Brian Jackel, Harald Frey, Mikko Syrjäso, Igor Voronko. The THEMIS all-sky imaging array—system design and initial results from the prototype imager // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2006. vol. 68. Is. 13. 1472-1487. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.03.027>
- [5] Kozelov B.V., Pilgaev S.V., Borovkov L.P. et al. Multi-scale auroral observations in Apatity: winter 2010-2011 // *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 2012. vol. 1, p. 1-6. <https://doi.org/10.5194/gi-1-1-2012>
- [6] Klimov P.A., Panasyuk M.I., Khrenov B.A. et al. The TUS Detector of Extreme Energy Cosmic Rays on Board the Lomonosov Satellite // *Space Sci. Rev.* 2017. vol. 212, 1687–1703. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0403-3>
- [7] http://smdc.sinp.msu.ru/index.py?nav=meteor_m2
- [8] Begenhin V.V., Nechaev O.Y., Zolotarev I.A. et al. An experiment in radiation measurement using the depron instrument // *Space Sci. Rev.* 2018. vol. 214. Is. 1. Art. 9.
- [9] Klimov P.A., Sigaeva K.F. Fast near-UV radiation pulsations measured by the space telescope TUS in the auroral region // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2021. vol. 220. 105672. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105672>
- [10] Klimov P. A., Sigaeva K.F. UV Pulsations in the Auroral Region According to Measurements on the Lomonosov Satellite // *Problems of Geocosmos–2020*. – Springer, Cham, 2022. – C. 421-430.
- [11] Bruce T. Tsurutani, Walter D. Gonzalez. The cause of high-intensity long duration continuous AE activity (HILDCAAs): Interplanetary Alfvén wave trains // *Planet. Space Sci.* 1987. vol. 35. No. 4. 405-412.