

УДК 524.1

РЕГИСТРАЦИЯ СВЕЧЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА В БЛИЖНЕМ УФ-ДИАПАЗОНЕ ОРБИТАЛЬНЫМ ДЕТЕКТОРОМ ТУС

© 2024 г. П. А. Климов¹*, К. Ф. Сигаева¹, В. В. Калегаев¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт
ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

*E-mail: pavel.klimov@gmail.com

Поступила в редакцию 24.05.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 31.10.2023

Детектор ТУС — высокочувствительный орбитальный телескоп. Благодаря полярной орбите космического аппарата детектор проводил наблюдения УФ-свечения атмосферы над овалом полярных сияний. Проведена регистрация событий с характерными для пульсирующих полярных сияний вариациями свечения. События расположены вдоль экваториальной границы аврорального овала, возникают во время длительных геомагнитных возмущений. Сопоставление с данными детекторов заряженных частиц показывает наличие повышенного потока высыпавшихся высокоэнергичных электронов (с энергиями более 100 кэВ) одновременное с УФ-свечением.

DOI: 10.31857/S0367676524020291, EDN: RPSQVJ

ВВЕДЕНИЕ

Телескоп ТУС (Трековая УСтановка) — первый в мире орбитальный детектор космических лучей предельно высоких энергий. Прибор запущен в апреле 2016 года на борту спутника «Ломоносов» и успешно проработал на орбите до декабря 2017 года. Детектор ТУС — высоко чувствительный телескоп-рефлектор, предназначенный для регистрации слабого УФ-свечения широких атмосферных ливней (ШАЛ). Прибор состоит из зеркала-концентратора площадью 2 м² и фотоприемника — матрицы из 256 пикселей (ФЭУ Hamamatsu R1463). Поле зрения одного пикселя 10 мрад, что соответствует площадке 5×5 км² на поверхности Земли. Общее поле зрения телескопа составляет 80×80 км² [1, 2].

В связи с ограниченным временем работы на орбите и высоким порогом регистрации прибор не зарегистрировал надежных кандидатов в события космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ). Однако высокая чувствительность детектора и хорошее временное разрешение позволили проводить исследования других оптических явлений в атмосфере Земли, например, метеоров, антропогенного свечения, транзитных световых явлений грозовой природы. Были также проведены измерения и УФ-треков в атмосфере Земли, скорее всего антропогенного происхождения [3, 4], что позволило разработать и апробировать алгоритмы поиска и реконструкции таких событий. Также

интересным результатом работы аппаратуры является регистрация необычных событий внегрозовой природы [5].

В данной работе приведены примеры измерения УФ-свечения аврорального овала и пульсирующих полярных сияний, что стало возможным благодаря полярной орбите спутника, а также сравнение с данными детекторов заряженных частиц на борту космического аппарата МЕТЕОР-М2.

РЕГИСТРАЦИЯ СВЕЧЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА

В фотоприемнике детектора ТУС реализован алгоритм автоматического управления высоким напряжением на ФЭУ, что позволяет существенно расширить динамический диапазон измерений и проводить регистрацию УФ свечения атмосферы как в самых темных областях (в безлунные ночи над поверхность океана, когда интенсивность свечения составляет $\sim 3 \cdot 10^7$ фотон/см²·ср⁻¹·с⁻¹), в районах активной антропогенной деятельности, где интенсивность свечения на порядок выше, а также в районе аврорального овала, где интенсивность может достигать 10^9 – 10^{10} фотон/см²·ср⁻¹·с⁻¹. В процессе движения по орбите примерно один раз в минуту происходит срабатывание системы отбора событий и записывается в память прибора как временная осциллограмма самого события, там и значение высокого напряжения, характеризующее

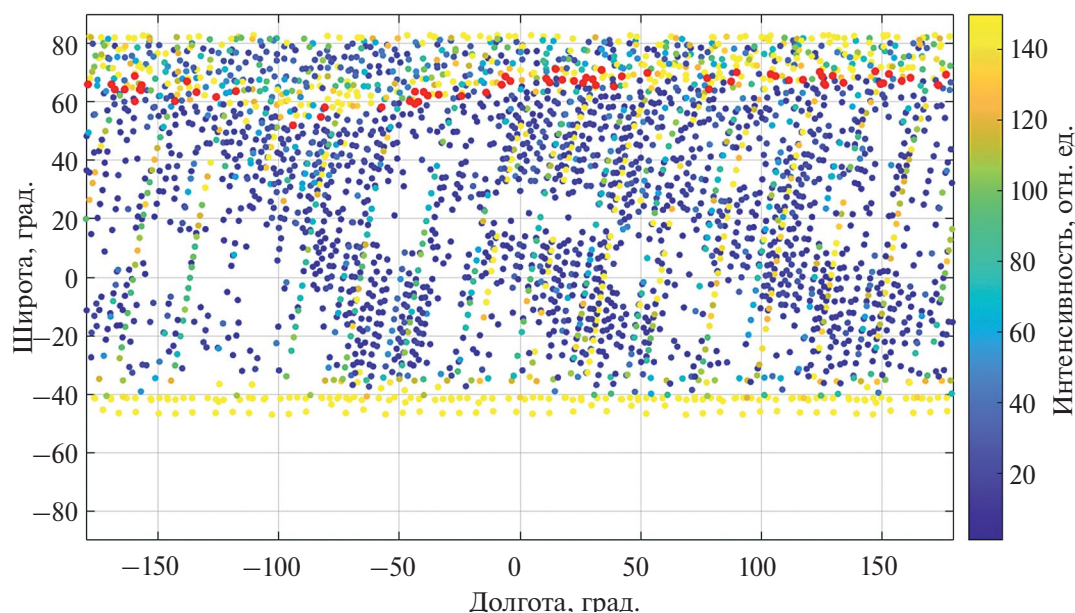


Рис. 1. Карта измерения интенсивности УФ-свечения детектором ТУС в первую неделю 2017 г. Цветом показана интенсивность в относительных единицах, красными точками — пульсирующие полярные сияния.

общую фоновую интенсивность свечения. На рис. 1 представлена суммарная карта измерений за одну неделю в начале 2017 года, когда детектор работал в режиме с временным разрешением 6.6 мс, фаза Луны была менее 50%, а в высоких широтах линия терминатора находилась севернее аврорального овала. Цветом отмечена интенсивность фонового свечения, красные точки показывают события с пульсирующими сияниями, о которых речь пойдет далее. На рисунке хорошо видны контуры материков, это связано с фактором антропогенной деятельности, а также яркая линия, совпадающая с положением аврорального овала. Интенсивность и ширина овала варьируются в зависимости от геомагнитной обстановки. К сожалению, за время пересечения овала происходит всего несколько измерений, поэтому детальной записи профиля свечения, как на спутниках «Университетский-Татьяна-2» [6] или «Вернов» [7, 8] получить не было возможности.

ПУЛЬСИРУЮЩИЕ ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

При анализе временных осциллограмм были обнаружены события, в которых присутствует значительная (более 10%) модуляция интенсивности свечения в поле зрения прибора. Эти события имеют очень разнообразную временную структуру с характерными частотами пульсаций порядка 1–10 Гц. Пространственные области свечения локализованы с характерным размером порядка 10 км, причем одновременно в поле зрения 80×80 км² может наблюдаться несколько областей с различными временными структурами. Анализ

географического распределения и геомагнитной обстановки показал, что события измеряются в суб-авроральной зоне, а частота событий коррелирует с повышенной геомагнитной активностью (АЕ-индекс > 200 нТл). Максимальная доля событий зарегистрирована в области L -оболочек 4–6 [9].

Эти события всегда регистрируются на экваториальной границе аврорального овала, что хорошо видно на рис. 1: красные точки расположены вдоль яркой области овала со стороны экватора. Частота пульсаций соответствует периоду внутренней модуляции, так называемых, пульсирующих полярных сияний. Это квазипериодические модуляции интенсивности свечения авроральной атмосферы, которые появляются преимущественно в полуденно-утреннем секторе MLT обычно во время фазы восстановления суббури, выглядят как нерегулярные пятна светимости с квазипериодическими временными флуктуациями, которые часто сопровождаются быстрыми сложными движениями их яркой части, синхронизированными с изменениями их светимости [10]. Основной период пульсаций (2–20 с и более) не может быть наблюден детектором ТУС, т.к. длительность развертки не превышает 1.7 с, а вот внутренняя модуляция на фоне подъема интенсивности свечения хорошо видна. Пульсирующие полярные сияния обычно возникают на экваториальном крае аврорального овала [11], что также наблюдается для событий, зарегистрированных детектором ТУС. Подробный анализ пространственно-временной структуры событий, а также анализ их расположения приведены в работе [9].

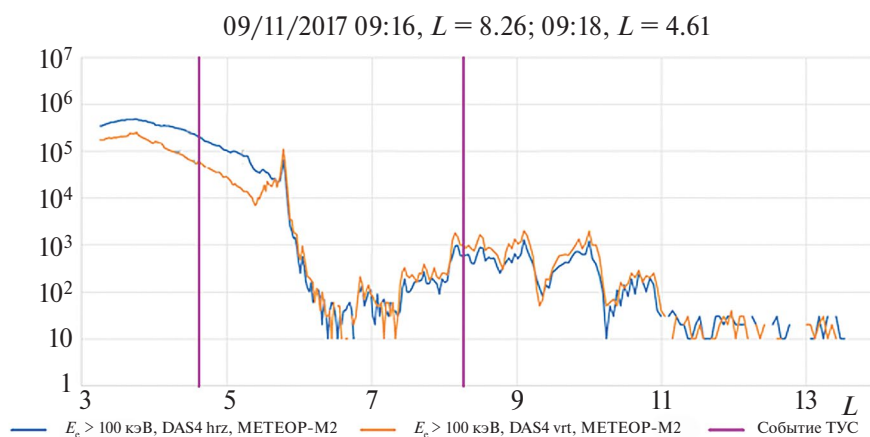


Рис. 2. Пример совместных измерений потоков энергичных электронов горизонтальным (DAS4hrz) и вертикальным (DAS4vrt) детекторами на спутнике МЕТЕОР-М2 (оранжевая и синяя кривые) и событий с УФ-пульсациями (вертикальные линии).

УФ-ПУЛЬСАЦИИ И ПОТОКИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Геомагнитная обстановка, наблюдаемая во время регистрации событий с пульсациями, характеризуется как фаза восстановления умеренной продолжительной бури с интенсивной суббуревой активностью. Такие периоды, когда в течение двух дней значение АЕ-индекса не падает менее 200 нТл, а пиковые значения достигают до 1000 нТл получили название high-intensity, long-duration, continuous AE activity (HILDCAA) events [12]. Во время этих событий наблюдается активная генерация хоровых волн, которая приводит к эффективному ускорению магнитосферных электронов. Было показано, что события типа HILDCAA хорошо коррелируют с увеличением потоков магнитосферных релятивистских ($E > 2$ МэВ) электронов, наблюдаемых на геосинхронной орбите с задержкой в ~ 1.5 дня от начала HILDCAA [13, 14]. Пульсирующие события в данных детектора ТУС наблюдаются также через несколько дней после начала суббури и события HILDCAA, во время фазы восстановления с множественными пиками АЕ-индекса.

Для анализа потоков заряженных частиц были выбраны детекторы на спутнике МЕТЕОР-М2. На спутнике установлено несколько детекторов заряженных частиц, в том числе горизонтальный MGS1-M и вертикальный SKL-M, которые позволяют измерять потоки электронов с энергиями от 100 кэВ до 8 МэВ. Причем, в высоких широтах вертикальный детектор направлен примерно вдоль магнитного поля, поэтому измеряет в основном высыпавшиеся частицы, а горизонтальный детектор — захваченные частицы. На рис. 2 приведен результат измерения потоков электронов с энергией более 100 кэВ во время

регистрации двух событий детектором ТУС (отмечены вертикальными линиями). Первое событие ($L = 4.61$) произошло в районе максимума внешнего радиационного пояса (РПЗ), где потоки в 10^4 раз превышают фоновые значения, а второе ($L = 8.26$) в высокоширотной области повышенных потоков энергичных электронов (10^2 от фоновых значений), существенно вне РПЗ, причем наблюдается заметная изотропизация потоков (показания вертикального и горизонтального детекторов сравниваются), что означает присутствие значительной доли электронов, высыпавшихся в атмосферу. Такая ситуация наблюдается в большинстве случаев, когда удастся найти близкие по расположению в магнитосфере измерения двух космических аппаратов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выполнены измерения УФ-свечения в авроральной зоне орбитальным детектором ТУС. Прибор показал свою эффективность для наблюдения оптических эффектов в высокоширотной атмосфере, связанных с проявлениями космической погоды. Показано, что в момент регистрации пульсирующих УФ-событий наблюдаются повышенные потоки энергичных электронов, вероятно связанные с развитием явления типа HILDCAA.

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>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klimov P.A., Panasyuk M.I., Khrenov B.A. et al. // Space Sci. Rev. 2017. V. 212. No. 3–4. P. 1687.
2. Климов П.А., Зотов М.Ю., Чирская Н.П. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 442; Klimov P.A., Zotov M.Yu., Chirskaia N.P. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 4. P. 407.
3. Khrenov B.A., Garipov G.K., Kaznacheeva M.A. et al. // JCAP. 2020. V. 2020. No. 3. Art. No. 033.
4. Klimov P.A., Khrenov B.A., Kaznacheeva M.A. et al. // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 20. P. 2449.
5. Казначеева М.А., Климов П.А., Хренов В.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1125; Kaznacheeva M.A., Klimov P.A., Khrenov B.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 8. P. 1024.
6. Sadovnichy V.A., Panasyuk M.I., Yashin I.V. et al. // Solar Syst. Res. 2011. V. 45. No. 1. P. 3.
7. Panasyuk M.I., Svertilov S.I., Bogomolov V.V. // Adv. Space Res. 2016. V. 57. No. 3. P. 835.
8. Klimov P., Garipov G., Khrenov B. et al. // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2017. V. 56. No. 8. P. 2189.
9. Klimov P.A., Sigaeva K.F. // J. Atmos. Sol. – Terr. Phys. 2021. V. 220. Art. No. 105672.
10. Yamamoto T. // JGR. Space Phys. 1988. V. 93. P. 897.
11. Duncan C., Creutzberg F., Gattinger R. et al. // Canad. J. Phys. 2011. V. 59. P. 1063.
12. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D. // Planet. Space Sci. 1987. V. 35. No. 4. P. 405.
13. Hajra R., Tsurutani B.T., Echer E. et al. // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. No. 6. P. 1876.
14. Hajra R., Tsurutani B.T., Echer E. et al. // Astrophys. J. 2015. V. 799. No. 1. P. 39.

Registration of the auroral near-UV emission by the orbital detector TUS

P. A. Klimov^{1, *}, K. F. Sigaeva¹, V. V. Kalegaev¹

¹Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: pavel.klimov@gmail.com

The TUS detector is a highly sensitive orbital telescope. Due to the polar orbit of the spacecraft, the detector made observations of the UV luminosity of the atmosphere above the aurora oval. Events with intensity variations characteristic of pulsating auroras have been registered. The events are located along the equatorial boundary of the auroral oval and occur during long-term geomagnetic disturbances. Comparison with data from charged particle detectors shows the presence of an increased flux of precipitating high-energy electrons (with energies above 100 keV) simultaneously with UV pulsations.