

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.026

ИЗМЕРЕНИЯ УФ СВЕЧЕНИЯ В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ ТЕЛЕСКОПОМ «ТУС» НА БОРТУ СПУТНИКА «ЛОМОНОСОВ»

П.А. Климов¹, М.И. Панасюк^{1,2}, К.Ф. Сигаева^{1,2}

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Аннотация. Детектор «ТУС» был запущен в апреле 2016 года на борту спутника «Ломоносов». Прибор представляет собой высокочувствительный телескоп с площадью зеркала 2 м² и высоким временным разрешением (0.8 мкс). Поле зрения прибора 6400 км², угловое разрешение 10 мрад, что соответствует квадрату 5×5 км на поверхности Земли. Спутник «Ломоносов» имеет полярную солнечно-синхронную орбиту с наклоном 97.6°, что позволяет проводить измерения вплоть до самых высоких широт на теневой стороне орбиты. Электроника детектора реализует несколько режимов работы, отличающихся временным разрешением (от 0.8 мкс до 6.6 мс) и позволяет регистрировать оптические явления различных временных масштабов. В данной работе проведен анализ УФ свечения в полярных областях северного полушария (50–80 градусов с.ш.), измеренного в режиме с временным разрешением 6.6 мс и длительностью развертки 1.7 с. Проанализированы около 2500 наблюдений в широком диапазоне долгот. Отобраны события, в которых наблюдается пространственно-временная динамика сигнала (пульсации УФ свечения), отличная от стационарного шума, антропогенных источников и отражений света от облачного покрова. Проведен анализ расположения выделенных событий относительно аврорального овала и показано, что они возникают в условиях повышенной геомагнитной активности и расположены на субавроральных широтах. Пространственные структуры локализованы в поле зрения прибора и имеют поперечный размер порядка 10 км, а частота пульсаций составляет 1–10 Гц.

Введение. На сегодняшний день механизмы образования авроральных пульсаций недостаточно изучены. Пульсирующие полярные сияния – это квазипериодические модуляции интенсивности протяженных форм, вызванные высыпаниями энергичных электронов с энергиями порядка 1-100 кэВ. Они появляются в виде нерегулярных пятен светимости с квазипериодическими (2–20 с или более) временными флуктуациями, которые часто сопровождаются быстрыми сложными движениями их яркой части [Yamamoto, 1988]. Мерцающее сияние состоит из небольших столбцов с периодическими изменениями интенсивности в дискретных дугах сияний. Первый отчет и описание событий такого типа было сделано в работе [Beach et al., 1968]. Позже были проведены многие оптические наблюдения мерцающего сияния, при анализе которых были получены некоторые особенности пространственно-временной структуры: ширина каждого мерцающего столбца находится в диапазоне 1–12 км [Sakanoi et al., 2004], а его время жизни составляет 1–2 с [Kunitake et al., 1984]. Амплитуда модуляции в светимости составляет менее 10–20 % от светимости фона, а типичные частоты – 3–15 Гц. Sakanoi et al. [2005] провели сравнение наблюдаемых параметров мерцающего сияния и теоретических оценок параметров дисперсионных альфвеновских волн и показали, что наблюдаемое мерцающее сияние может быть вызвано модуляцией потока электронов электромагнитными ионными циклотронными волнами или инерциальными альфвеновскими волнами в области ускорения сияний, расположенной в диапазоне высот 2000–5000 км. Дискретные аврооры могут вызываться микровспышками высыпавшихся электронов во внешнем радиационном поясе за счет их рассеяния на волнах типа «вистлер» [Shumko, 2018]. Эта идея пичч-углового рассеяния электронов на вистлерах находит подтверждение в симуляционной модели [Mioshi et al., 2010, 2015]. В работе [Sato et al., 2004] проведено прямое сравнение пульсирующих полярных сияний, наблюдаемых с земли на станции Suowa в Антарктике и на борту спутника FAST (высота 3100 км) и получено, что исходные области генерации или модуляции энергичных частиц находятся выше, чем орбита спутника FAST, а именно в области от 2 Re до 6 Re от него. Многие работы связывают как основные периоды модуляции, так и тонкую структуру пульсирующих сияний с ОНЧ сигналами (квазипериодическими и хоровыми излучениями) [Demekhov et al., 1994; Nishimura et al., 2011; Kawamura et al., 2019]. Подобные модели, основанные на механизме взаимодействия типа «волна-частица», указывают на его пространственную локализацию в области замкнутых силовых линий внешней области радиационных поясов. Однако известно, что транзитные потоки электронов могут создаваться за счет реализации физических процессов ускорения в

ближнем плазменном слое (см., например, [Sauvaud et al., 2004]). Дрейфуя вдоль магнитных силовых линий, они должны высыпаться в атмосферу, создавая дискретные сияния и тем самым стать дополнительным или конкурирующим механизмом их генерации.

В данной работе приведены новые экспериментальные данные о пульсирующих излучениях в районе аврорального овала, измеренных детектором «ТУС» на борту спутника «Ломоносов».

1. Измерения УФ свечения на спутниках МГУ. Исследования УФ излучения атмосферы проводятся в НИИЯФ МГУ с 2005 года, когда был запущен спутник «Университетский-Татьяна» [Садовничий и др., 2007]. На борту спутника был установлен детектор УФ излучения, состоящий из одного ФЭУ со считывающей электроникой и полем зрения 16° [Гарипов и др., 2006]. Затем аналогичные приборы работали на космических аппаратах «Университетский-Татьяна-2» [Garipov et al., 2010] и «Вернов» [Panasyuk et al., 2016]. Все спутники обладали полярной орбитой, поэтому была возможность регистрировать как грозовые, в основном приэкваториальные УФ вспышки, так и свечение на высоких широтах. По данным спутника «Университетский-Татьяна» исследовалась корреляция возрастных потоков электронов в полярной области и интенсивности УФ излучения [Веденькин и др., 2006]. По данным спутника «Вернов» было показано, что интенсивность стационарного свечения аврорального овала, положение его границ и пространственная структура зависят от геомагнитной обстановки. Так, при увеличении индекса A_e с 100 нТл до 1000 нТл интенсивность свечения увеличивается в 1.5 раза, экваториальная граница смещается в область низких широт более чем на 10 градусов, и появляется двугорбая структура. Пример измерений показан на рис. 1.

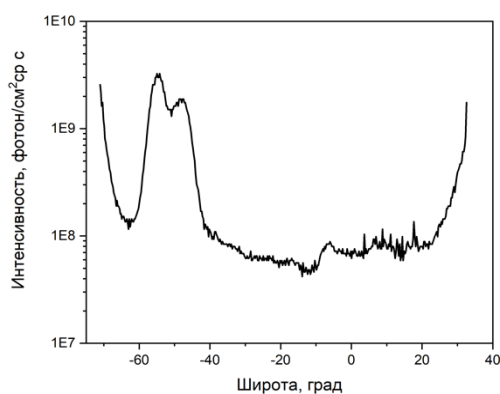


Рисунок 1. Пример измерения свечения аврорального овала ($40^\circ - 60^\circ$ Ю.Ш.) детектором на спутнике «Вернов» при $A_e = 1000$ нТл.

Однако отсутствие пространственного разрешения у всех детекторов на этих космических аппаратах не позволяло исследовать пространственно-временную структуру регистрируемых событий.

В 2016 году на борту спутника «Ломоносов» [Sadovnichii et al., 2017] был запущен детектор УФ излучения «ТУС». Детектор «ТУС» – высокочувствительный телескоп, предназначенный для регистрации слабого УФ свечения широких атмосферных ливней. Детектор представляет собой телескоп-рефлектор, состоящий из зеркала-концентратора площадью 2 м^2 и фотоприемника – матрицы из 256 пикселей (ФЭУ Hamamatsu R1463). Поле зрения одного пикселя на поверхности Земли – квадрат $5 \times 5 \text{ км}$, общее поле зрения составляет $80 \times 80 \text{ км}$ [Klimov et al., 2017]. Высокая чувствительность и несколько режимов работы, отличающиеся временным разрешением (0.8 мкс, 25.6 мкс, 0.4 мс и 6.6 мс), позволили регистрировать и изучать свечения разнообразной природы: метеоры,

антропогенное свечение, грозовые явления (молнии и высоко атмосферные транзитные световые явления) и пр., провести измерения УФ треков в атмосфере Земли [Khrenov et al., 2020; Klimov et al., 2019], а также УФ пульсаций в высоких широтах, представленных в данной работе.

2. События с УФ пульсациями в высоких широтах. За время работы детектора «ТУС» в режиме с разрешением 6.6 мс было зарегистрировано чуть более 10 тысяч событий на ночной стороне орбиты. Из них порядка 2500 в широтах более 50° С.Ш. Среди измерений большая доля событий – флуктуации стационарного шума, наблюдаются антропогенные источники, которые выделены характерной скоростью перемещения в поле зрения детектора, равной скорости движения спутника, и модуляцией сигнала промышленной частотой. Отдельно был выделен класс событий, в которых наблюдаются пульсации УФ свечения, не связанные ни с грозовой активностью, ни с антропогенными источниками, ни с облачным покровом.

Пример события с пульсациями показан на рисунке 2. Слева на рисунке приведена карта каналов (матрица фотоприемника – пространственная структура события) с пространственным разрешением 4 км на высоте 100 км в момент времени 430 мс от начала записи. Справа показана осциллограмма сигнала в одном канале (модуль 7, пиксель 14). Видно увеличение сигнала в течение 1.2 с, с явными пульсациями. Период пульсаций составляет около 0.3 с, а амплитуда – 20 % от уровня фона.

Всего было обнаружено 67 таких событий в базе данных детектора «ТУС». События имеют характерное географическое распределение вдоль аврорального овала (см. рис. 3, слева). Важно отметить, что события были зарегистрированы в районе экваториальной границы овала на довольно малых L-оболочках. На рис. 3 справа приведён пример расположения события, показанного на рис. 2, относительно аврорального овала

(показан суммарный поток энергии авроральных электронов, <https://iswa.ccmc.gsfc.nasa.gov/IswaSystemWebApp/>). Более половины событий зарегистрированы на L-оболочках 4–6, в области пересечения аврорального овала и внешнего радиационного пояса.

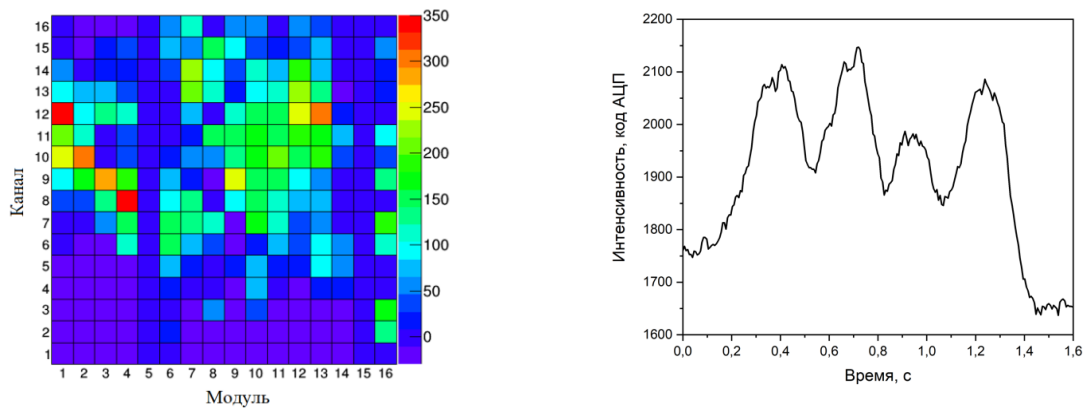


Рисунок 2. Пример события с УФ-пульсациями, измеренными детектором «ТУС» 10 ноября 2017 г. в 13-31 UTC.

Пространственное разрешение прибора определяется размером пикселя и функцией рассеяния точки (ФРТ) оптической системы. Угловой размер одного пикселя составляет 10 мрад, что соответствует площадке 5×5 км на поверхности Земли. ФРТ была измерена в ходе предполетных испытаний аппаратуры, и ее $R_{RMS} = 7-10$ мм. Таким образом, при фокусировании происходит размытие изображения точечного источника на несколько соседних каналов. Поэтому точность локализации размеров области свечения составляет порядка 10 км, и основным критерием, по которому оценивается размер источника, является количество пикселей с определенной формой осциллограммы (временного хода сигнала). В большинстве регистрируемых событий вид УФ пульсаций не одинаков во всем поле зрения, наблюдаются локальные группы пикселей с близкими по форме временными особенностями. На примере, показанном на рис. 2 видны несколько областей повышенного свечения, которые сопоставимы или несколько больше ФРТ зеркала, т.е. размер источника составляет от одного до нескольких пикселей (5–15 км).

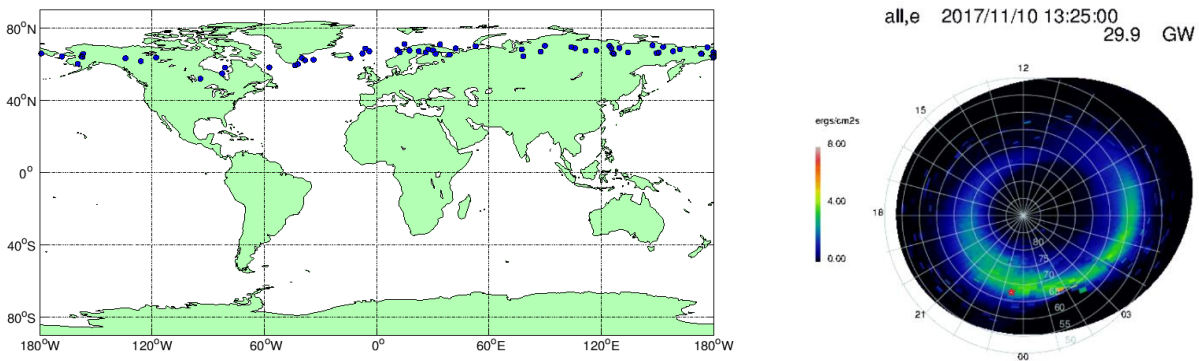


Рисунок 3. Слева: географическое распределение 67 событий с УФ пульсациями (синие точки). Справа: расположение события, измеренного детектором «ТУС» 10 ноября 2017 г. в 13-31 UTC (красная точка) относительно аврорального овала по данным <https://iswa.ccmc.gsfc.nasa.gov/IswaSystemWebApp/>

3. Заключение. Благодаря полярной орбите и высокой чувствительности детектор «ТУС» зарегистрировал ультрафиолетовые пульсации атмосферного свечения в высоких широтах. Наблюдаемые сигналы 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 км может наблюдаться несколько областей с различными временными структурами. Анализ географического распределения и геомагнитной обстановки показал, что события измеряются в субавроральной зоне, а частота событий коррелирует с геомагнитной активностью (Ае-индексом). Максимальная доля событий зарегистрирована в области L-оболочек 4–6. Этот вывод не

противоречит «волновому» механизму их генерации и его локализации во внешней зоне радиационных поясов. Пространственно-временная структура некоторых из наблюдавшихся событий схожа с мерцающими полярными сияниями, наблюдавшимися ранее (см., например, [Sakanoi *et al.*, 2005]). Тем не менее, полностью исключить «хвостовую» модель их генерации нельзя, т.к. деформация магнитного поля, которая должна наблюдаться во время усиления геомагнитной активности (что было отмечено в описанных событиях), также должна приводить к смещению границы замкнутых силовых линий к Земле, и зарегистрированные события могли оказаться на открытых силовых линиях. Поэтому необходимы дальнейшие исследования орбитальными детекторами УФ излучения наряду с измерениями потоков электронов, которые позволяют получить глобальную картину генерации событий такого типа. Сравнение с данными наблюдений наземных геофизических обсерваторий в полярных широтах и со спутниковыми данными о потоках заряженных частиц также поможет выявить природу явления.

Благодарности. Данная работа выполнена при финансовой поддержке Госкорпорации Роскосмос и Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в рамках программы «Перспективные направления развития».

Список литературы

- Beach R., Cresswell G.R., Davis T.N., Hallinan T.J., Sweet L.R., Flickering, a 10-cps fluctuation within bright auroras // *Planetary and Space Science*, V. 16, No. 12, p. 1525-1526, in9-in10, 1527-1529, 1968.
- Garipov G.K., Khrenov B.A., Klimov P.A., *et al.*, Program of transient UV event research at Tatiana-2 satellite // *J. Geophys. Res.*, V. 115, 2010.
- Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Y., A mechanism of formation of pulsating aurorae // *J. Geophys. Res.*, V. 99, No. 4, p. 5831-5841, 1994.
- Kawamura S., Hosokawa K., Kurita S., *et al.*, Tracking the region of high correlation between pulsating aurora and chorus: Simultaneous observations with Arase satellite and ground-based all-sky imager in Russia // *J. Geophys. Res.: Space Physics*, V. 124, p. 2769-2778, 2019.
- Khrenov B.A., Garipov G.K., Kaznacheeva M.A., *et al.*, An extensive-air-shower-like event registered with the TUS orbital detector // *JCAP*, 2020(03):033, 2020.
- 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 Science Reviews*, V. 212, No. 3-4, p. 1687-1703, 2017.
- Klimov P.A., Khrenov B.A., Kaznacheeva M.A., *et al.*, Remote sensing of the atmosphere by the ultraviolet detector TUS onboard the Lomonosov satellite // *Remote Sensing*, V. 11, No. 20, 2019.
- Kunitake M., Ogoti T., Spatial-temporal characteristics of flickering spots in flickering auroras // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, V. 36, No. 4, p. 121-138, 1984.
- Miyoshi Y., Katoh Y., Nishiyama T., *et al.*, Time of flight analysis of pulsating aurora electrons, considering wave-particle interactions with propagating whistler mode waves // *J. Geophys. Res.*, V. 115, A10312, 2010.
- Miyoshi Y., Oyama S., Saito S., *et al.*, Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: EISCAT and Van Allen Probes observations // *J. Geophys. Res.: Space Physics*, V. 120, p. 2754-2766, 2015.
- Nishimura Y., *et al.*, Multievent study of the correlation between pulsating aurora and whistler mode chorus emissions // *J. Geophys. Res.*, V. 116, A11221, 2011.
- Panasyuk M.I., Svertilov S.I., Bogomolov V.V., *et al.*, RELEC mission: Relativistic electron precipitation and TLE study on-board small spacecraft // *Advances in Space Research*, V. 57, No 3, p. 835-849, 2016.
- Sadovnichii V.A., Panasyuk M.A., *et al.*, "Lomonosov" satellite – space observatory to study extreme phenomena in space // *Space Science Reviews*, V. 212, No. 3-4, p. 1705-1738, 2017.
- Sakanoi K., Fukunishi H., Temporal and spatial structures of flickering aurora derived from high-speed imaging photometer observations at Syowa Station in the Antarctic // *J. Geophys. Res.: Space Physics*, V. 109(A1), A01221, 2004.
- Sakanoi K., Fukunishi H., Kasahara Y., A possible generation mechanism of temporal and spatial structures of flickering aurora // *J. Geophys. Res.*, V. 110, A03206, 2005.
- Sato N., Wright D.M., Carlson C.W., *et al.*, Generation region of pulsating aurora obtained simultaneously by the FAST satellite and a Syowa-Iceland conjugate pair of observatories // *J. Geophys. Res.*, V. 109, A10201, 2004.
- Sauvaud J.A., Kovrazhkin R.A., Two types of energy-dispersed ion structures at the plasma sheet boundary // *J. Geophys. Res.*, V. 109, A12213, 2004.
- Shumko M., Turner D.L., O'Brien T.P., *et al.*, Evidence of microbursts observed near the equatorial plane in the outer Van Allen radiation belt // *Geophysical Research Letters*, V. 45, p. 8044-8053, 2018.
- Yamatoto T., On the temporal fluctuations of pulsating auroral luminosity // *J. Geophys. Res.: Space Physics*, V. 93, No. A2, p. 897-911, 1988.
- Веденькин Н.Н., Дмитриев А.В., Гарипов Г.К., *и др.*, УФ-излучение атмосферы и сопоставление вариаций его интенсивности с вариациями потоков электронов с энергиями > 70 кэВ на орбите спутника (по данным ИСЗ «Университетский-Татьяна») // *Вестник МГУ Сер. физика и астрономия*, № 4, стр. 89-93, 2006.
- Гарипов Г.К., Панасюк М.И., Рубинштейн И.А., *и др.*, Детектор ультрафиолетового излучения научно-образовательного микроспутника МГУ «Университетский – Татьяна» // *Приборы и техника эксперимента*, №1, стр. 135-141, 2006.
- Садовничий В.А., Панасюк М.И., Бобровников С.Ю., *и др.*, Первые результаты исследований космической среды на спутнике Университетский-Татьяна // *Космические исследования*, Т. 45, № 4, стр. 291-305, 2007.