

УДК 524.1

СОВМЕСТНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПУЛЬСИРУЮЩИХ СИЯНИЙ НА СПУТНИКЕ ЛОМОНОСОВ И КАМЕРОЙ ВСЕГО НЕБА НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

© 2022 г. П. А. Климов¹ *, Б. В. Козелов², А. В. Ролдугин², К. Ф. Сигаева¹

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

²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт, Анатиты, Россия

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

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

В 2016–2017 гг. на борту спутника Ломоносов работал высокочувствительный телескоп с высоким временным разрешением ТУС. Детектором произведены измерения УФ пульсаций в авроральной зоне с временным разрешением 6.6 мс. Проанализированы случаи совместных наблюдений детектором ТУС и камерой всего неба на Кольском полуострове, показано, что поле зрения ТУС проецируется в широкую область пульсирующих полярных сияний и определена тонкая временная структура пульсаций.

DOI: 10.31857/S0367676522030115

ВВЕДЕНИЕ

Пульсирующие полярные сияния, то есть квазипериодические модуляции интенсивности свечения атмосферы, являются типичным проявлением высокоширотной авроральной активности. Они появляются преимущественно в полудно-утреннем секторе MLT обычно во время фазы восстановления суббури, выглядят как нерегулярные пятна светимости с квазипериодическими (2–20 с и более) временными флуктуациями, которые часто сопровождаются быстрыми сложными движениями их яркой части, синхронизированными с изменениями их светимости [1]. Пульсирующие полярные сияния обычно возникают на экваториальном крае аврорального овала, а более низкие частоты пульсаций, как правило, наблюдаются на более низких широтах [2].

Различают следующие типы пульсирующих сияний по пространственной структуре и модуляции интенсивности: pure pulsations (фиксированного размера и формы), expanding pulsations, streaming aurora (пятно, удаляющееся от исходного положения), flashing aurora и т.д. [3].

Типичный интервал пульсаций – в диапазоне от нескольких до нескольких десятков секунд. В некоторых случаях наблюдается так называемая “внутренняя модуляция”, которая представляет собой гораздо более быстрые пульсации светимости

(~3 Гц), заключенные в единичный импульс основной пульсации [4].

Типичная высота пульсирующего свечения свидетельствует о том, что авроральные пульсации генерируются высыпанием электронов с энергией 20–40 кэВ [5]. Причиной этих высыпаний является взаимодействие между магнитосферными электронами и электромагнитными ОНЧ/КНЧ (хоровыми) волнами, и, по крайней мере, периоды основных пульсаций могут быть объяснены одним из режимов проточного циклотронного магнитосферно-ионосферного лазера [6, 7]. Путем координированных измерений с использованием данных сверхбыстрых камер в Арктике и магнитосферного спутника ARASE было показано, что существует прямая связь между многомасштабными временными вариациями мощности хоровых волн и светимостью полярных сияний [8]. Также полученная динамика области наибольшей корреляции ОНЧ излучений на спутнике ARASE и пульсирующих сияний на Кольском полуострове подтверждает заключение о существовании неоднородностей повышенной плотности холодной плазмы, в которых ОНЧ излучения распространяются каналлизованным способом [9].

Наземные наблюдения за свечением аврорального овала регулярно проводятся на различных станциях. Такие наблюдения требуют хорошей

погоды и позволяют получать информацию только в одном локальном районе. Эта проблема частично решается путем объединения данных с камер, расположенных близко друг к другу. Временное разрешение таких наблюдений ограничено практически только чувствительностью используемого регистратора и характерным временем жизни физико-химических реакций, приводящих к эмиссии в исследуемом участке длин волн.

Облачный покров значительно ниже области свечения, что при наблюдениях со спутника позволяет проводить измерения независимо от погодных условий, а из-за движения космического аппарата по орбите измерения проводятся в разных географических районах, как в южном, так и северном полушариях. В то же время временное разрешение ограничено временем пролета наблюдаемой области в поле зрения, что накладывает особые требования к чувствительности используемого регистратора. Спутник Ломоносов имел полярную солнечно-синхронную орбиту, что позволяло проводить наблюдения в полярной области с высокой чувствительностью за счет большой апертуры оптической системы телескопа ТУС. Таким образом, появилась возможность измерить тонкую пространственно-временную структуру слабой люминесценции в ближнем УФ диапазоне (300–400 нм) в авроральной и субавроральной областях.

Сравнение с результатами наблюдений наземных камер позволяет сопоставить спутниковые данные с положением аврорального овала и феноменологической классификацией видов аврорального свечения, а высокая чувствительность и временное разрешение телескопа ТУС – получить дополнительные сведения о пространственно-временной структуре внутренних высококачественных модуляций свечения.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В 2016 г. на борту спутника Ломоносов [7] был запущен детектор УФ излучения ТУС. Детектор ТУС – высоко чувствительный телескоп-рефлектор, предназначенный для регистрации слабого УФ свечения широких атмосферных ливней. Прибор состоит из зеркала-концентратора площадью 2 м^2 и фотоприемника – матрицы из 256 пикселей (ФЭУ Hamamatsu R1463). Поле зрения одного пикселя 10 мрад, что соответствует площадке $5 \times 5 \text{ км}^2$ на поверхности Земли. Общее поле зрения телескопа составляет $80 \times 80 \text{ км}^2$ [11]. Высокая чувствительность и несколько режимов работы с разным 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, высоко атмосферные транзиентные свето-

вые явления), а также провести измерения УФ треков в атмосфере Земли [12, 13]. В высоких широтах зарегистрированы УФ пульсации на экваториальной границе авроральной зоны [14].

Для анализа общей динамики полярных сияний будем использовать данные панхроматической (в широком спектральном диапазоне, охватывающем видимый свет) камеры всего неба, работающей вблизи г. Апатиты и входящей в систему MAIN (Multiscale Auroral Imaging Network), детальное описание которой приведено в работе [15]. Камера имеет поле зрения 180 градусов, регистрация производится захватом и суммированием 24 кадров в секунду с GPS привязкой по времени. Данные с камеры представляют собой ежесекундные массивы 300×288 16 битных чисел. Для быстрого просмотра и отбора данных используется архив http://aurora.pgia.ru/keogram/obs_list.php?camera_name=allsky.

В данной работе представлен анализ событий в авроральной зоне, которые удалось пронаблюдать совместно орбитальным телескопом и наземными камерами.

РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

За время работы детектора ТУС с временным разрешением 6.6 мс из всей базы данных было отобрано 66 событий в высоких широтах, и в которых наблюдаются быстрые вариации УФ свечения, не связанные с антропогенной и грозовой активностью. Из них 6 событий зарегистрированы в районе полей зрения наземных камер ПГИ на Кольском полуострове. Два из них были записаны 03.01.2017 г. в течение одного ночного пролета спутника и анализируются в данной работе:

– Событие № 1 зарегистрировано в 22:17:25 UTC, координаты центра поля зрения телескопа ТУС: 70.92° с. ш., 33.85° в. д.

– Событие № 2 зарегистрировано в 22:18:19 UTC, координаты центра поля зрения телескопа ТУС: 67.71° с. ш., 30.14° в. д.

Изображения камер всего неба для этих моментов времени показаны на рис. 1. На рис. 2 приведена кеограмма, построенная по данным камеры всего неба, т.е. зависимость от времени интенсивности свечения в проходящем через зенит сечении поля зрения камеры с севера на юг. Из кеограммы видно, что в течение получасового интервала времени во всем поле зрения камеры постоянно наблюдались пульсирующие сияния.

Первое событие зарегистрировано на краю поля зрения камеры, однако хорошо видно, что в месте регистрации присутствует довольно яркое свечение. Вследствие этого в большей части модулей фотоприемника детектора ТУС сработала система автоматической регулировки усиления

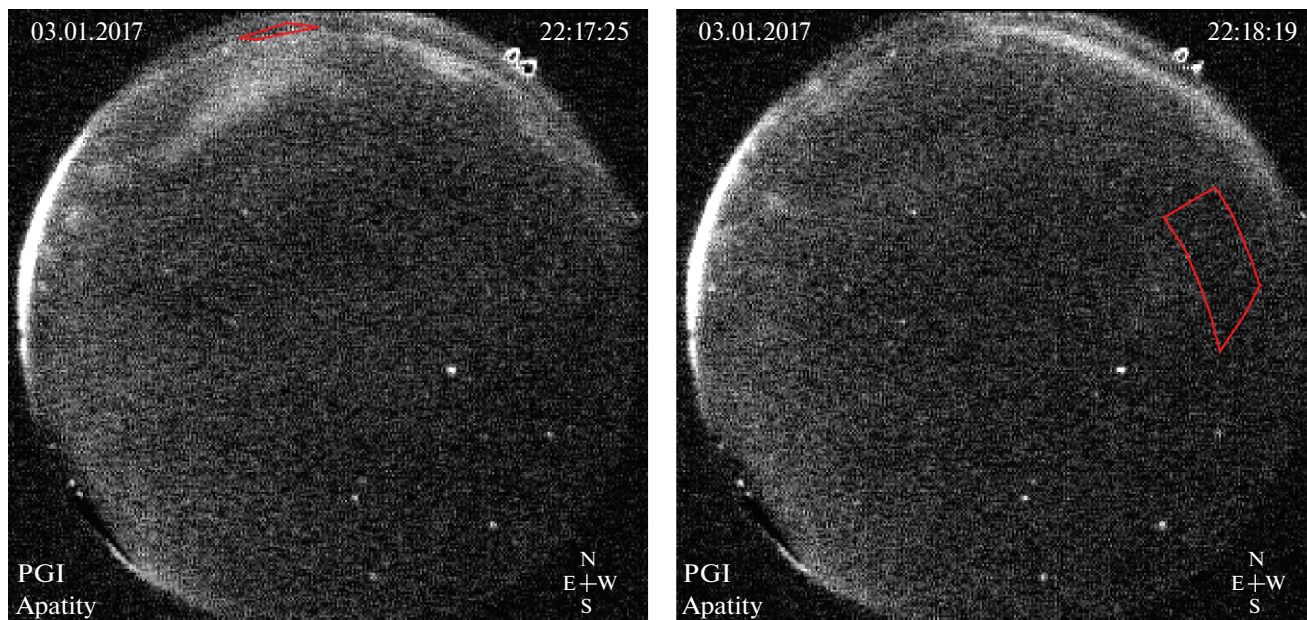


Рис. 1. Изображения камер всего неба ПГИ в момент регистрации событий с УФ пульсациями на спутнике Ломоносов (поле зрения детектора ТУС показано красными контурами).

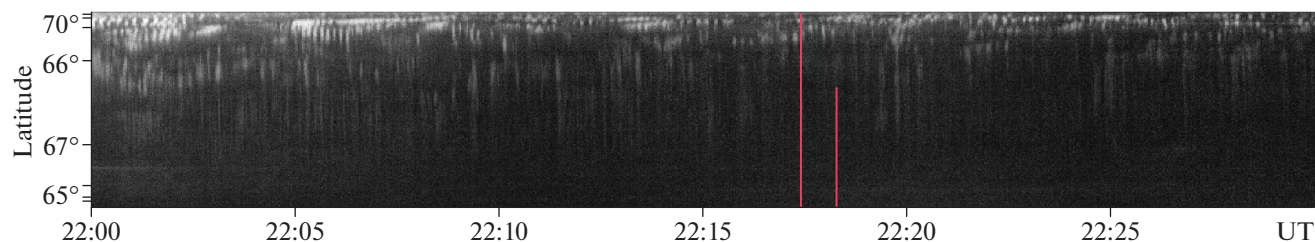


Рис. 2. Кеогамма, полученная при обработки данных камер всего неба ПГИ для вечера 03.01.2021. Красными линиями показаны моменты регистрации событий спутником Ломоносов.

(АРУ), переключая высокое напряжение на ФЭУ, что существенно затрудняет реконструкцию временного профиля. В связи с этим были выбраны два модуля с минимальной чувствительностью, где не происходило подстройки усиления. Осциллограммы двух каналов фотоприемника представлены на рис. 3. Представленные два канала являются соседними в матрице по диагонали (центры полей зрения на расстоянии 7 км). В целом видна схожая временная динамика с небольшим сдвигом в 1–2 такта измерения. Анализ частот пульсаций показывает, что основная мода лежит на частоте 4.2 Гц.

Второе событие наблюдалось ближе к центру поля зрения камеры (см. рис. 1). На рис. 4 (слева) приведено географическое расположение события и карта каналов фотоприемника детектора ТУС. На карте отмечены каналы, в которых наблюдаются различные вариации УФ свечения. В правой части фотоприемника детектора ТУС на-

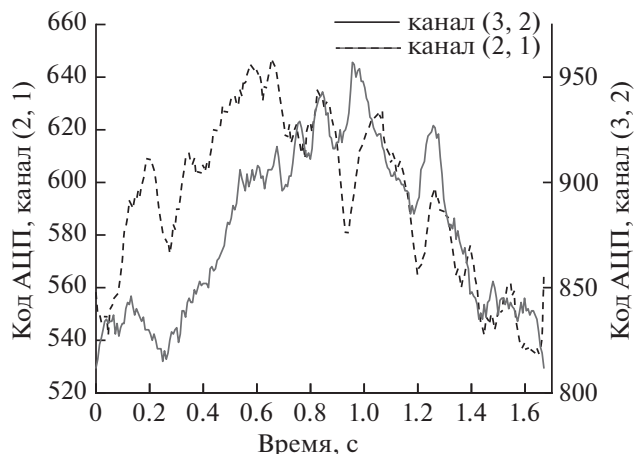


Рис. 3. Осциллограммы каналов (2, 1) – пунктирная линия и (3, 2) – сплошная линия события 2017-01-03, 22:17:25UTC.

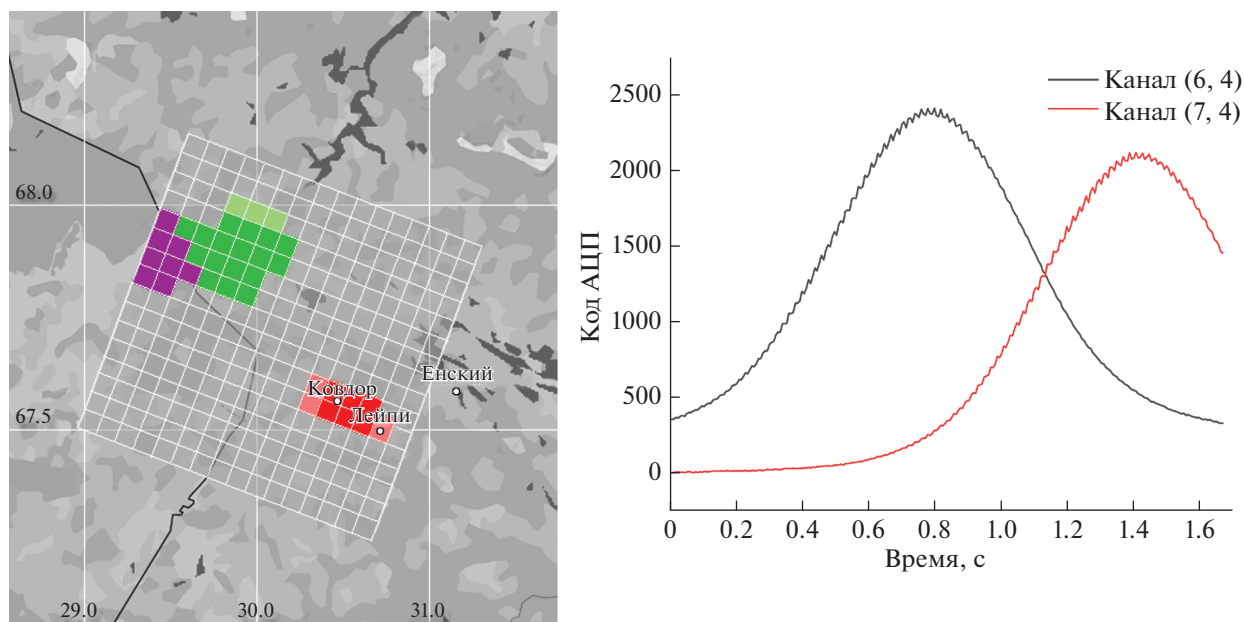


Рис. 4. Слева: карта каналов матрицы фотоприемника события 03.01.2017 22:18:19 UTC (фиолетовым и зеленым закрашены области УФ пульсаций, красным — область антропогенного свечения). Справа: осциллограммы сигнала от населенного пункта, попавшего в поле зрения детектора ТУС (Ковдор).

блюдается сигнал от населенного пункта Ковдор (каналы отмечены красным цветом), который можно идентифицировать по скорости перемещения максимума сигнала по фотоприемнику и модуляции на промышленной частоте (две осциллограммы соседних каналов показаны на рис. 4, справа). В тоже время, в других каналах наблюдаются пульсации другого характера. Примеры характерных осциллограмм приведены на рис. 5. В каналах ближе к центру поля зрения наблюдаются два пика на фоне общего спада сигнала с разницей во времени 0.32 с, что соответствует частоте

пульсации 3.1 Гц (на карте каналов отмечены зеленым цветом). В каналах на краю поля зрения (на карте каналов отмечены фиолетовым) расстояние между пиками больше — 0.58 с (1.7 Гц). Спад сигнала может быть связан с уменьшением интенсивности свечения просматриваемых областей за счет движения спутника.

Области различных пульсаций расположены вплотную друг к другу, так что в каналах на пересечении областей наблюдается смесь двух типов осциллограмм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ совместных наблюдений камер всего неба, расположенных на Кольском полуострове, и высокочувствительного телескопа ТУС, работавшего на спутнике Ломоносов в 2016–2017 гг. Всего обнаружено 6 событий из базы данных детектора ТУС, попадающих в поле зрения наземных камер, в которых наблюдаются быстрые вариации УФ свечения. Во всех случаях поле зрения детектора проецируется в широкую область пульсирующих полярных сияний. Отдельно рассмотрены два последовательных события, зарегистрированных во время одного пролета 03.01.2017 в 22:17:25 и 22:18:19 UTC. В первом случае пульсации наблюдаются на фоне яркого аврорального свечения, что привело к снижению чувствительности прибора. Модуляция свечения происходит на частоте 4.2 Гц. Во втором событии свечение менее интенсивное, причем

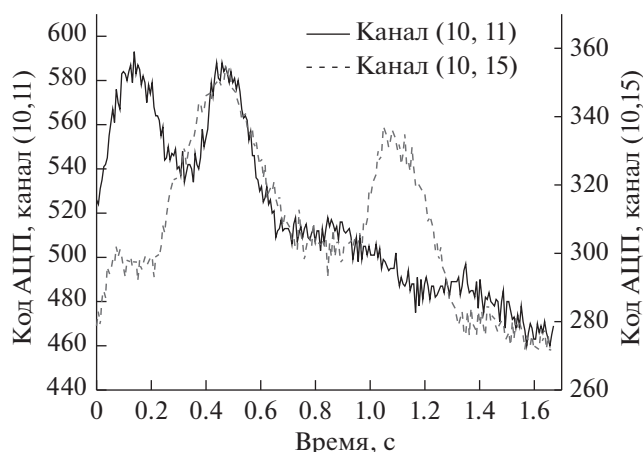


Рис. 5. Осциллограммы каналов (10, 11) — сплошная линия и (10, 15) — пунктирная линия события 2017-01-03, 22:17:25UTC.

можно выделить две смежные протяженные области с разным периодом пульсации. В каналах ближе к центру поля зрения наблюдаются два пика на фоне общего спада сигнала с разницей во времени 0.32 с, а ближе к краю поля зрения (западнее) расстояние между пиками больше – 0.58 с.

Работа ПАК и КФС выполнена при финансовой поддержке ГК Роскосмос и МГУ им. М.В. Ломоносова в рамках Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета “Фундаментальные и прикладные исследования космоса”. Авторы благодарят коллаборацию “Ломоносов” и команду разработчиков детектора ТУС. Работа БВК и АВР выполнялась в рамках темы государственного задания Полярного геофизического института.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yamamoto T. // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 897
2. Duncan C., Creutzberg F., Gattinger R. et al. // Can. J. Phys. 2011. V. 59. P. 1063.
3. Nishimura Y., Lessard M.R., Katoh Y. et al. // Space Sci. Rev. 2020. V. 216. P. 4.
4. Nishiyama T., Sakanoi T., Miyoshi Y. et al. // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. P. 3514.
5. Козелов Б.В., Ролдугин А.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 3. С. 366; Kozelov B.V., Rodulgin A.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 3. P. 256.
6. Трахтенгерц В.Ю., Райкрофт М.Дж. Свистовые и альфвеновские циклотронные мазеры в космосе. М.: Физматлит, 2011. 344 с.
7. Kasahara S., Miyoshi Y., Yokota S. et al. // Nature. 2018. V. 554. P. 337.
8. Hosokawa K., Miyoshi Y., Ozaki M. et al. // Sci. Rep. 2020. V. 10. P. 3380.
9. Kawamura S., Hosokawa K., Kurita S. et al. // J. Geophys. Res. 2019. Art. No. A026496.
10. Sadovnichii V.A., Panasyuk M.I., Amelyushkin A.M. et al. // Space Sci. Rev. 2017. V. 212. P. 1705.
11. Klimov P.A., Panasyuk M.I., Khrenov B.A. et al. // Space Sci. Rev. 2017. V. 212. P. 1687.
12. Khrenov B.A., Garipov G.K., Kaznacheeva M.A. et al. // JCAP. 2020. No. 3. Art. No. 033.
13. Klimov P.A., Khrenov B.A., Kaznacheeva M.A. et al. // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 20. P. 2449.
14. Климов П.А., Панасюк М.И., Сигаева К.Ф. // Proc. XLIII Ann. Seminar. (Apatity, 2020). С. 109.
15. Kozelov B.V., Pilgaev S.V., Borovkov L.P. et al. // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 2012. V. 1. P. 1.

Joint registration of pulsing aurora on the Lomonosov satellite and all-sky camera on the Kola Peninsula

P. A. Klimov^{a,*}, B. V. Kozelov^b, A. V. Roldugin^b, K. F. Sigaeva^a

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

^b Polar Geophysical Institute, Murmansk, 183010 Russia

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

A highly sensitive telescope with a high temporal resolution TUS was operating on board the Lomonosov satellite in 2016–2017. The detector measured UV pulsations in the auroral zone with a time resolution of 6.6 ms. The cases of joint observations by the TUS detector and the all-sky camera on the Kola Peninsula are analyzed, it is shown that the TUS field of view is projected into a wide region of pulsating auroras, and the fine temporal structure of pulsations is determined.