

УДК 524.1

ЧАСТОТНЫЙ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ ПО ДАННЫМ ИЗОБРАЖАЮЩЕГО ФОТОМЕТРА НА ПОЛИГОНЕ “ВЕРХНЕТУЛОМСКИЙ”

© 2024 г. П. А. Климов^{1, *}, А. А. Белов^{1, 2}, Б. В. Козелов³, А. С. Мурашов¹, В. Д. Николаева¹, А. В. Ролдугин³, С. А. Шаракин¹, Д. А. Трофимов^{1, 2}, А. А. Трусов^{1, 2}, К. Д. Щелканов^{1, 2}

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 образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова”, Физический факультет, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Полярный геофизический институт”, Мурманск, Россия

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

Поступила в редакцию 24.08.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

На базе полигонов Полярного геофизического института на Кольском полуострове создается система изображающих фотометров высокого временного разрешения (Pulsating Aurora Imaging Photometers System, PAIPS) для исследования структуры пульсирующих полярных сияний (ППС) в ближнем ультрафиолетовом диапазоне (300–400 нм). Представлено описание двух случаев измерения ППС системой PAIPS совместно с камерами всего неба. Для первого приведен частотный анализ сигнала и показано, что в течение полутора часов пульсации происходят на квазипостоянной частоте около 1 Гц. Для второго приведены измерения соотношения интенсивности в линиях 337 и 391 нм. Анализ одно-временных наблюдений оптических камер в поле зрения спектрометра показывает, что в пульсациях свечение на фазе “включено” является более “зеленым”, т.е. соответствует менее энергичным выпадающим электронам, при этом стереометрические наблюдения с камерой в обсерватории “Ловозеро” дают максимумы коэффициента корреляции временных рядов камер на высотах 145–150 км и ~92 км.

DOI: 10.31857/S0367676524030051, EDN: QMWKBZ

ВВЕДЕНИЕ

Одним из нерешенных вопросов в физике полярных сияний остаются типология и механизмы происхождения пульсирующих полярных сияний [1], а также роль высокоэнергичной компоненты заряженных частиц в их образовании [2]. Математическое моделирование [3] и измерения радарными некогерентного рассеяния [4] указывают на существенную долю электронов с энергией более 100 кэВ, обеспечивающих дополнительную ионизацию и свечение на высотах 60–80 км, в то время как в основном видимые сияния происходят выше 80 км.

В целях прояснения этих вопросов на Кольском полуострове силами НИИЯФ МГУ и ПГИ создается система изображающих высокочувствительных фотометров (Pulsating Aurora Imaging Photometers System, PAIPS) для измерения в ближнем УФ-диапазоне (300–400 нм) и реконструкции

пространственного распределения свечения с помощью методов триангуляции. Один фотометр установлен на полигоне “Верхнетуломский” (VTL) в сентябре 2021 г., ведет наблюдения в зенит с временным разрешением 41 мс (1 мс с сентября 2022 г.) в непрерывном мониторинговом режиме. Второй фотометр планируется установить осенью 2023 г. на полигоне “Ловозеро” (LOZ) в 150 км от первого. Фотометр в “Ловозеро” будет направлен в сторону горизонта и измерять высотное распределение интенсивности свечения над полигоном “Верхнетуломский” в диапазоне от 30 до 120 км.

Высокая чувствительность и пространственное разрешение обеспечиваются использованием матрицы многоканальных фотоэлектронных умножителей, работающих в режиме счета фотонов, и площадью оптической системы (20 см² для VTL и почти 500 см² для LOZ). Более подробное описание аппаратуры можно найти в работах [5, 6].

В 2023 г. в дополнение к основной изображающей части фотометра был запущен многоканальный спектрометр, выполненный на основе ФЭУ с интерференционными светофильтрами, расположенными на входных окнах ФЭУ. Наибольший интерес представляют измерения линий второй положительной системы азота (N_2 2PG) — 337.1 нм и первой отрицательной системы (N_2^+ 1N) — 391.4 нм. Для первой системы время жизни возбужденного состояния — 50 нс, что обеспечивает эффективную высоту гашения столкновениями с нейтральной составляющей атмосферы только около 30 км. Для второй системы время жизни — 70 нс, эффективная высота гашения — 48 км [7]. Таким образом, соотношение интенсивностей этих линий может служить индикатором высоты свечения (чем больше доля N_2 2PG, тем ниже в атмосфере находится источник свечения), а значит, и энергии электронов, вызывающих данное свечение (более детальное обсуждение см. далее).

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСИРУЮЩИХ СИЯНИЙ

Характерная временная структура ППС проявляется в чередовании фаз “включено” (увеличение яркости пульсирующего пятна) и “выключено”.

При этом длительности фаз, как правило, не являются фиксированными. Зачастую на фазе “включено” присутствует внутренняя модуляция на более высокой частоте (3–5 Гц) [8]. Анализ отдельных фрагментов ППС, регистрируемых изображающим фотометром на полигоне “Верхнетуломский”, в целом, подтверждает наличие такой структуры, как и значительного разнообразия пространственно-временных форм ППС [9]. Зачастую временная структура пульсирующих сияний довольно сложна и невозможно выделить какую-то доминирующую и долгоживущую частоту пульсаций, поэтому случаи регистрации длительных квазипериодических колебаний крайне интересны. Для примера рассмотрим измерения 9 марта 2022 г. На рис. 1 показана спектрограмма, полученная за 1.5 ч работы фотометра с временным разрешением 40 мс. Присутствует постоянная модуляция с плавно уменьшающейся со временем частотой, а также кратные частоты, говорящие об ангармоничном характере пульсаций. В начале появления модуляции основная частота составила 1.1 Гц, и за 1.5 ч она уменьшилась до 0.64 Гц. Таким образом, скорость изменения частоты составляет ~0.3 Гц/ч.

Одновременно с оптическими наблюдениями на полигоне “Верхнетуломский” проводятся измерения вариации магнитного поля. До появления описываемых оптических пульсаций

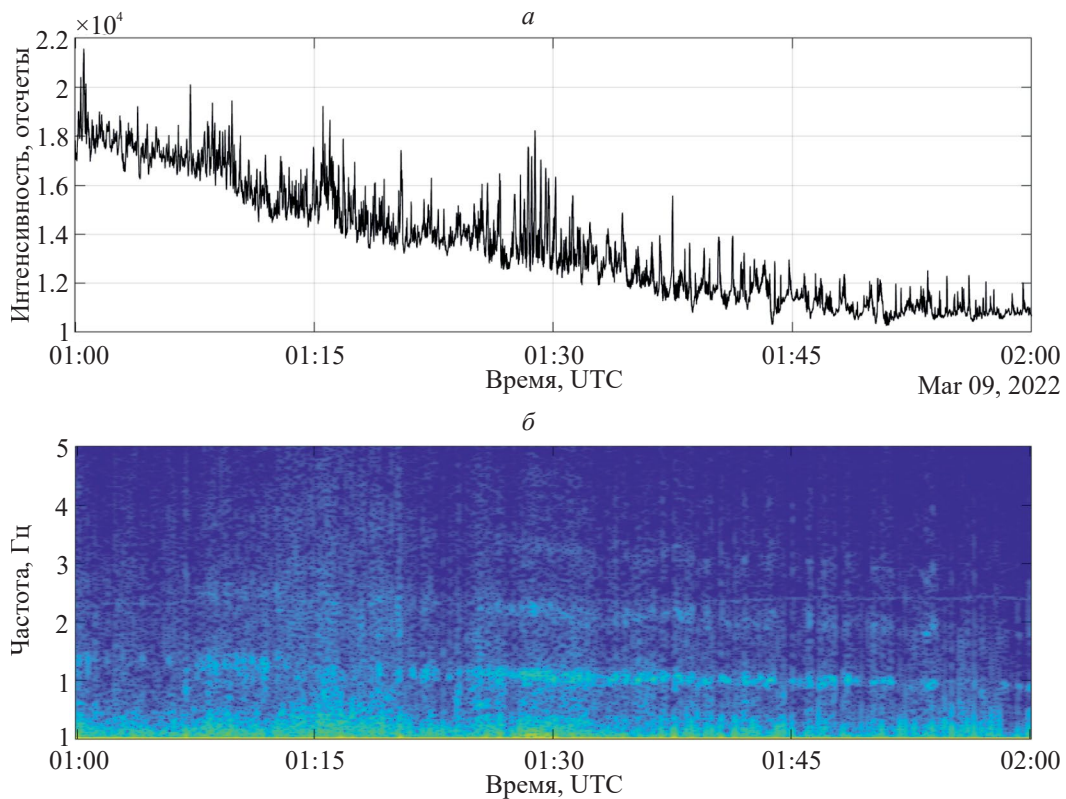


Рис. 1. Интенсивность излучения во время ППС (а), измеренная фотометром изображающим фотометром интегрально по полю зрения в диапазоне длин волн 300–400 нм; спектрограмма суммарного сигнала фотометра (б).

наблюдаются PиС-пульсации, и одновременно с ними колебания убывающего периода.

Аналогичные случаи встречаются и в другие дни измерений, как правило, на заключительной стадии развития ППС. Частоты пульсаций находятся в достаточно широком интервале: от 0.3 Гц до нескольких герц. Геомагнитная обстановка во время этих наблюдений, как правило, спокойная или слабо возмущенная.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСИРУЮЩИХ СИЯНИЙ

В верхней части атмосферы (более 100 км) соотношение интенсивностей линий 2PG (337.1 нм) и 1NG (391.4 нм) практически не зависит от высоты и составляет порядка 5, согласно расчетам в [10]. Однако эти расчеты были проведены для довольно низких энергий электронов — от 0.1 до 16 кэВ. В недавних исследованиях прохождения МэВ-ных пучков электронов через атмосферу было показано, что соотношение интенсивности излучений $P_{391/337}$ изменяется с высотой и лежит в диапазоне 1.65 (для

высоты около 50 км) до 1.95 (для 100 км) [11]. Таким образом, на основе измерения $P_{391/337}$ можно сделать оценку высоты излучения.

По данным фотометра в VTL в спокойное время, при измерении фонового излучения чистого ночного неба это отношение колеблется в районе единицы и изменяется в большую сторону, как и его флуктуации, во время полярных сияний. Например, на верхней панели рис. 2а приведены результаты измерений спектрометра за небольшой интервал времени при наблюдении ППС. Черной линией на графике показана зависимость $P_{391/337}$ от времени, а синей — измерения в канале 391 нм. Видно в целом синхронное поведение обеих кривых, но при этом соотношение $P_{391/337}$ существенно изменяется, причем так, что при большей интенсивности соотношение $P_{391/337}$ увеличивается. Приведенное на рисунке отношение учитывает спектральные особенности пропускания всех оптических элементов детектора, а также квантовой эффективности ФЭУ. Однако отношение $P_{391/337}$ не согласуется ни с расчетами [9], ни с результатами моделирования прохождения МэВ-ных пучков в работе [10].

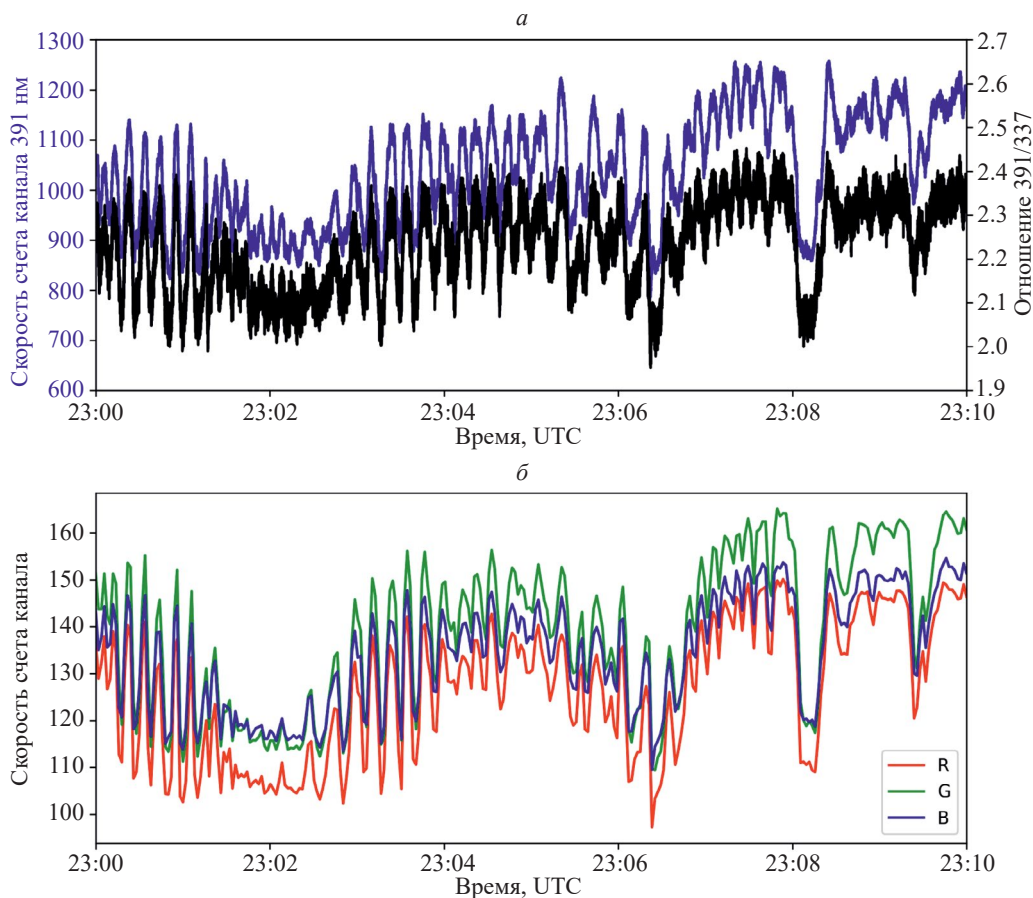


Рис. 2. Наблюдения для случая 17 марта 2023 г. на Верхнетулумском полигоне: данные спектрометра — зависимость отношения $P_{391/337}$ (левая вертикальная ось) и темпа счета фотометра (правая ось) от времени (а); данные цветной камеры всего неба — интенсивности по каналам цветности (б).

С февраля 2023 г. на Верхнетуломском полигоне проводятся наблюдения новой камерой всего неба в RGB-цветах. Камера собрана на основе астрокамеры ZWO ASI533MC Pro с сенсором Sony IMX533. В марте 2023 г. она работала в режиме 270×270 пикселей (1 кадр в 2 с). Поле зрения спектрометра было выделено на кадрах этой камеры, также были рассчитаны огибающие в RGB-цветах для того же интервала времени: 23:00—23:10 UT, приведенные на нижней панели рис. 2. Видно хорошее соответствие временному ходу в измерениях спектрометра.

Отношения R/G и V/G в зависимости от интенсивности зеленого канала приведены на рис. 3. Видно, что отношение R/G в рассмотренных пульсациях остается постоянным, в то же время при росте интенсивности в зеленом канале отношение V/G уменьшается максимум на 10%. Можно ожидать, что рост интенсивности в зеленом канале во время пульсаций, при постоянном отношении интенсивностей в зеленом и красном каналах, вызывается потоком менее энергичных электронов, возбуждающих в основном линии атомарного кислорода на высотах более 120 км и не дающих заметного вклада в возбуждение линий азота в синей части спектра, происходящее в основном на меньших высотах [10].

Высоту излучения можно оценить из стереометрических измерений с использованием

данных второй камеры в обсерватории “Ловозеро”. Узкоугольная камера в обсерватории “Ловозеро” основана на астрокамере ZWO ASI294MC Pro с сенсором Sony IMX294. На камеру дополнительно установлен фильтр, обрезаящий полосу 400—700 нм. Был проведен расчет положения поля зрения спектрометра на кадрах узкоугольной камеры в обсерватории “Ловозеро” в зависимости от высоты, на которой может располагаться свечение, с учетом ракурсных искажений и искажений объективов. Затем, интегрируя кадры узкоугольной камеры по полю для данной высоты, получаем огибающие для высот проекций от 80 до 200 км (от 80 до 100 км с шагом 2 км, от 100 до 200 км с шагом 5 км) для трех каналов цветности. Вычисления коэффициента корреляции Пирсона с вариациями на камере на полигоне “Верхнетуломский” дают зависимости, приведенные на рис. 4. Из рисунка видно, что максимум корреляции (~ 0.87) достигается на высотах 145—150 км, также присутствует локальный максимум (~ 0.5) на 92 км. Эти высоты соответствуют энергиям высыпавшихся электронов $\sim 1.2\text{--}1.3$ кэВ и ~ 40 кэВ соответственно [10].

Стоит иметь в виду, что чувствительность авроральных камер только в видимом световом диапазоне не позволяет регистрировать линии 391 и 337 нм. Поэтому однозначный ответ о минимальной высоте излучения и ее соответствия

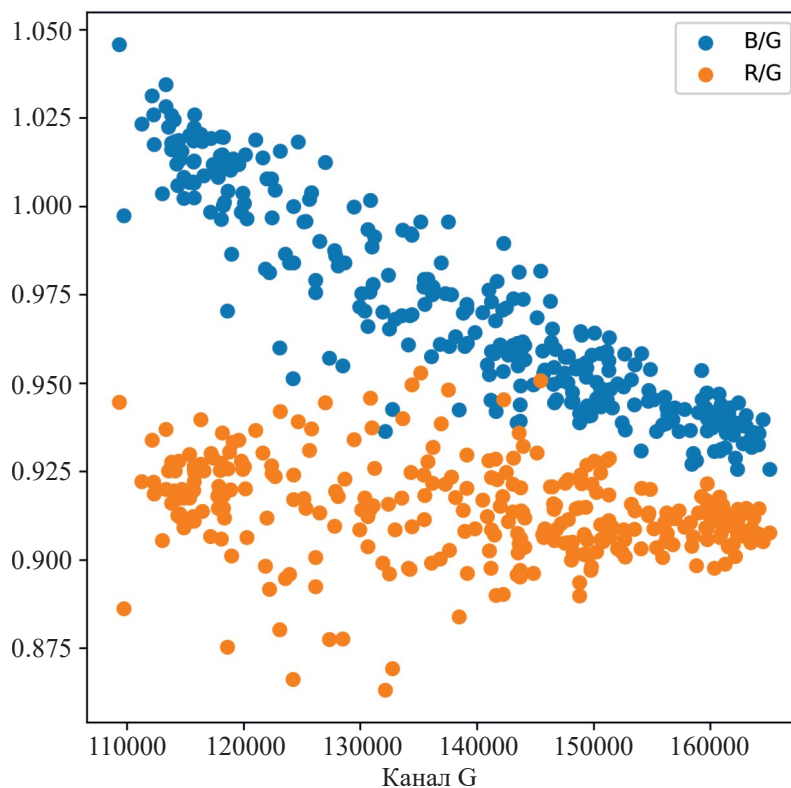


Рис. 3. Зависимости отношения R/G и V/G от интенсивности зеленого (G) канала.

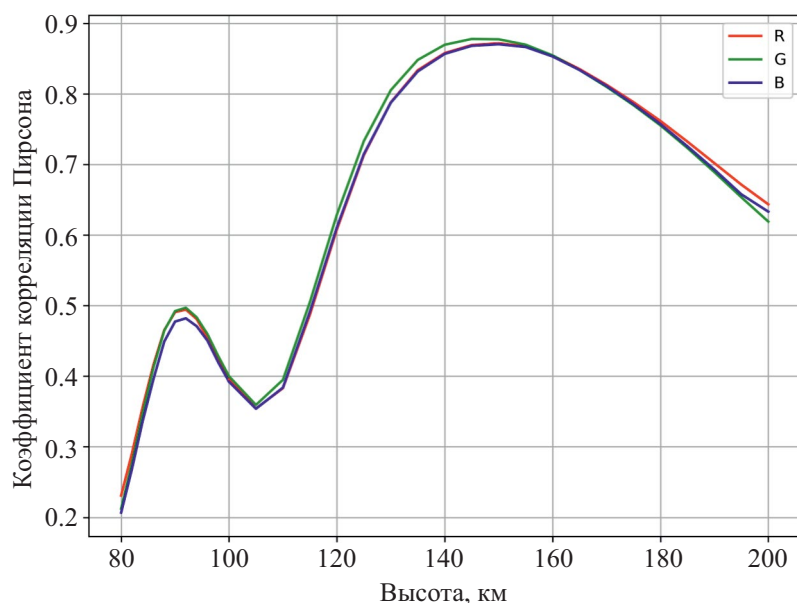


Рис. 4. Зависимость коэффициента корреляции огибающих на камерах от высоты проекции поля зрения спектрометра.

измеряемым спектрам удастся получить после ввода в эксплуатацию второго изображающего фотометра в “Ловозеро” с теми же спектральными характеристиками и высокой чувствительностью в ближнем УФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фотометры системы RAIPS позволяют измерять тонкую пространственно-временную структуру аврорального свечения, а также некоторые его спектральные особенности. В частности, обнаружены длительные (более часа) интервалы, в течение которых наблюдаются пульсации на квазипостоянной частоте, медленно изменяющейся с течением времени. Например, 9 марта 2021 г. такой интервал длился более 1.5 ч, а основная частота колебаний за это время изменилась от 1.1 до 0.64 Гц.

С другой стороны, на основе данных высокочувствительного спектрометра показано, что соотношение $P_{391/337}$ в отсутствие полярных сияний и облачности практически равно единице, в разы возрастает во время сияний и коррелирует с их яркостью. Во время пульсаций это отношение больше для фазы “включено”, чем для фазы “выключено” ППС и меняется в районе значений 2—2.3. Анализ изображений оптических камер в поле зрения спектрометра показывает, что свечение на фазе “включено” является более “зеленым”, т.е. соответствует менее энергичным высыпавшимся электронам, при этом максимумы коэффициента корреляции временных рядов камер соответствуют высотам 145—150 км и ~92 км. Однако при дальнейшем анализе важно учесть, что

спектральные чувствительности камер и фотометра существенно отличаются. В настоящее время продолжаются набор статистики измерения и поиск теоретического объяснения такому поведению спектра излучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-62-00010). Авторы благодарят коллаборацию JEM-EUSO за возможность использования технологий коллаборации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nishimura Y., Lessard M.R., Katoh Y. et al.* // Space Sci. Rev. 2020. V. 216. P. 4.
2. *Shumko M., Gallardo-Lacourt B., Halford A.J. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2021. V. 48. No. 18. Art. No. e2021GL094696.
3. *Miyoshi Y., Saito S., Kurita S. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47. Art. No. e90360.
4. *Tesema F., Partamies N., Nesse Tyssoy H., McKay D.* // Ann. Geophys. 2020. V. 38. P. 1191.
5. *Belov A.A., Klimov P.A., Kozelov B.V. et al.* // J. Atm. Solar — Terr. Phys. 2022. Art. No. 105905.
6. *Klimov P., Sharakin S., Belov A. et al.* // Atmosphere. 2022. V. 13. No. 10. P. 1572.
7. *Vallance Jones A.* // In: Aurora. Part of the GAAM. 1974. V. 9. P. 80.
8. *Hosokawa K., Miyoshi Y., Ozaki M. et al.* // Sci. Reports. 2020. V. 10. No. 1. P. 1.
9. *Белов А.А., Климов П.А., Козелов Б.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 2. С. 241; *Belov A.A.,*

- Klimov P.A., Kozelov B.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 2. P. 207.*
10. *Иванов В.Е., Козелов Б.В. Прохождение электронных и протонно-водородных пучков в атмосфере Земли. Апатиты: Изд. Кольского науч. центра, 2001. 260 с.*
11. *Marshall R.A., Xu W., Kero A. et al. // Front. Astron. Space Sci. 2019. V. 6. Art. No. 6.*

Frequency and spectral analysis of pulsing aurora according to the data of the imaging photometer at the Verkhnetulomsky observatory

P. A. Klimov^{1, *}, A. A. Belov^{1, 2}, B. V. Kozelov³, A. S. Murashov¹, V. D. Nikolaeva¹, A. V. Roldugin³, S. A. Sharakin¹, D. A. Trofimov^{1, 2}, A. A. Trusov^{1, 2}, K. D. Shchelkanov^{1, 2}

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

²*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Russia*

³*Polar Geophysical Institute, Murmansk 183010 Russia*

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

A Pulsating Aurora Imaging Photometers System (PAIPS) is being created using observatories of the Polar Geophysical Institute on the Kola Peninsula to study the structure of pulsating auroras (PsA) in the near ultraviolet range (300–400 nm). We presented a description of two PsA cases measured by the PAIPS system together with all-sky cameras. For the first one, a frequency analysis of the signal is given and it is shown that for an hour and a half, pulsations occur at a quasi-constant frequency of about 1 Hz. For the second one, measurements of the intensity ratio in the 337 and 391 nm wavelengths are presented. An analysis of simultaneous observations of optical cameras in the field of view of the spectrometer shows that the emission in the “on” phase is “greener”, i.e., corresponds to less energetic precipitating electrons. Stereometric observations with a camera in observatory Lovozero gives the maximum correlation coefficient for the time series of cameras at altitudes of 145–150 km and ~92 km.