



DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.032

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ СТРУКТУР СВЕЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ 22.02.2022 ПО ДАННЫМ ИЗОБРАЖАЮЩЕГО ФОТОМЕТРА В ОБСЕРВАТОРИИ «ВЕРХНЕТУЛОМСКАЯ»

К.Ф. Сигаева, П.А. Климов, А.А. Белов, С.А. Шаракин

*Научно-исследовательский институт ядерной физики им. М.В. Скобельцына,
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 1(2), Ленинские горы,
Москва 119991, Россия*

Аннотация

В сентябре 2021 года в обсерватории «Верхнетуломская» Полярного геофизического института был установлен оптический комплекс, включающий высокочувствительный изображающий фотометр. Детектирующая часть выполнена на основе многоанодных фотоэлектронных умножителей, что позволяет регистрировать свечение атмосферы в ближнем УФ-диапазоне (240–400 нм) с высокой чувствительностью и высоким временным разрешением (от 2.5 мкс).

В работе представлены результаты частотного анализа пульсаций УФ-свечения, зарегистрированного 22 февраля 2022 года. Рассмотрены более 4 часов измерений, в течение которых наблюдаются различные пространственно-временные паттерны с квазипериодическими пульсациями. С 17:00 до 18:00 часов происходят вариации интенсивности на частотах около 1–2 Гц по всему полю зрения, с 19:00 до 21:00 часов появляется более высокочастотная компонента: 3.5–4 Гц, сочетающаяся с низкочастотными (0.3 Гц) прямоугольными импульсами.

Введение

Пульсирующие полярные сияния (ППС) являются одним из самых интересных типов свечения верхних слоев атмосферы. Данное явление известно и изучается с 70х годов прошлого века (одно из первых упоминаний [1]), является типом диффузных полярных сияний и характеризуется периодическим изменением интенсивности свечения отдельных пятен. Было отмечено, что модуляция интенсивности свечения ППС представляет собой суперпозицию двух частот. Период основной пульсации колеблется в районе нескольких десятков секунд. Другая – так называемая «внутренняя модуляция», представляющая собой гораздо более быстрые изменения светимости (около 3 Гц), встроена в один импульс основной пульсации, как правило на фазе «включено». ППС происходят, в основном, в полуночно-утреннем секторе MLT и как правило на фазе восстановления суббури [2]. Были проведены различные измерения высоты возникновения ППС. В частности, в работе [3] было установлено, что пульсации на основной частоте (период 3-6 секунд) происходят на высоте около 95 км, а при включении внутренней частоты (2 Гц) высота высвечивания снижается до 92 км, что может свидетельствовать об увеличении энергии высыпавшихся электронов. Обнаружена корреляция пульсирующих полярных сияний, наблюдаемых камерами всего неба и хоровых волн (по данным спутника Arase) [2] и показано однозначное совпадение временных структур ППС и волновых пакетов, включая внутреннюю модуляцию сигнала на частоте около 3 Гц.

Отдельные пульсирующие авроральные структуры могут различаться по форме, размеру, высоте, пространственной стабильности, временной модуляции, продолжительности жизни и скорости перемещения в пространстве [4]. Предполагается, что авроральные пульсации вызваны высыпанием электронов с энергиями 1–10 кэВ, так как характерная высота высвечивания составляет около 100 км. Причиной этих высыпаний считается взаимодействие магнитосферных электронов с электромагнитными ОНЧ-волнами [5]. С другой стороны, было показано, что и пульсирующие сияния, и микровсплески релятивистских электронов могут быть продуктами взаимодействия хоровых волн и частиц [6]. В этом случае излучение должно происходить существенно ниже. Также были получены подтверждения того, что причиной возникновения пульсирующих полярных сияний может быть комбинированное воздействие хоровых волн нижнего диапазона и циклотронных гармонических волн [7]. Данные волны оказывают влияние на электроны различных энергий: десятки кэВ и несколько кэВ соответственно, что приводит к появлению пульсирующих полярных сияний на разных высотах, а следовательно, возникновению сложных структур пульсирующих полярных сияний.

На спутнике «Ломоносов» также были зарегистрированы пульсации аврорального свечения. Так, по данным детектора ТУС, установленного на указанном спутнике, были проанализированы 66 событий пульсирующих полярных сияний с частотами вплоть до 20 Гц, при этом пик распределения приходится на частоты от 3 до 5 Гц [8]. Для детального исследования пространственно-временных структур ППС необходимо использовать высокочувствительные фотометры высокого временного разрешения, наряду с обычными камерами. Такие фотометры разработаны и используются в проекте RAIPS [9, 10].

Инструменты

В данной работе используются данные, полученные при помощи изображающего фотометра, установленного в обсерватории «Верхнетуломская» ПГИ (VTL, 68.63° с.ш., 31.78° в.д.) в сентябре 2021 года. Фотометр представляет собой линзовый телескоп. Оптическая система – прозрачная в ближнем УФ диапазоне (300–400 нм) линза диаметром 5 см и с фокусным расстоянием 15 см). Фотодетектор – матрица из 4 многоанодных фотоэлектронных умножителей (МАФЭУ), состоящих из 64 пикселей каждый, покрытых фильтрами BG3. Преобразование сигнала с каждого МАФЭУ в цифровой вид производится с помощью специализированных микросхем SPACIROC-3.

Электроника детектора обеспечивает два режима работы с разрешением 2.5 мкс и 0.32 мс, а также возможность проводить мониторинговые измерения с разрешением ~41 мс. Указанные выше режимы позволяют регистрировать явления различной длительности и природы. В сентябре 2022 года временное разрешение мониторинговых измерений уменьшили до 1 мс.

Детектор установлен непосредственно рядом с камерой всего неба ПГИ и наблюдает центральную часть (20°×20°) ее поля зрения, что позволяет проводить совместные измерения в УФ и оптическом диапазоне. Каждый пиксель имеет поле зрения 1.2°, что соответствует пространственному разрешению около 2 км на высоте порядка 100 км.

Результаты и обсуждение

В данной работе проведен подробный анализ временной структуры интенсивности свечения в поле зрения фотометра 22 февраля 2022 г.

Измерения проводились в отсутствие сильных геомагнитных возмущений. Так, на левой панели рис. 1 приведен профиль АЕ-индекса для рассматриваемого в данной работе дня. Хорошо видно, что в моменты регистрации пульсаций максимальное значение АЕ-индекса не превышали 350 нТл. На правой панели рис. 1 приведен профиль Dst-индекса. Наблюдается небольшая суббуря (приблизительно -40 нТл).

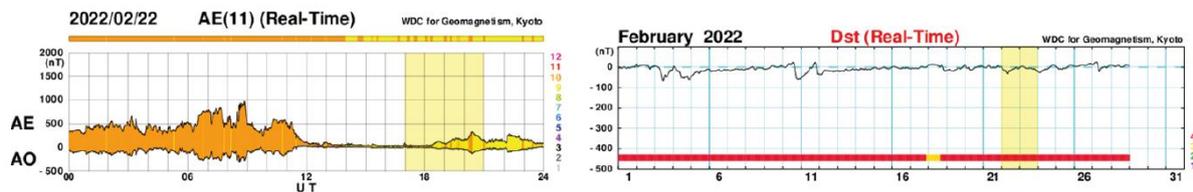


Рисунок 1. Слева: профиль АЕ-индекса 22.02.2022 (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>), справа: профиль Dst-индекса за февраль 2022 (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>). Желтым отмечены моменты регистрации события.

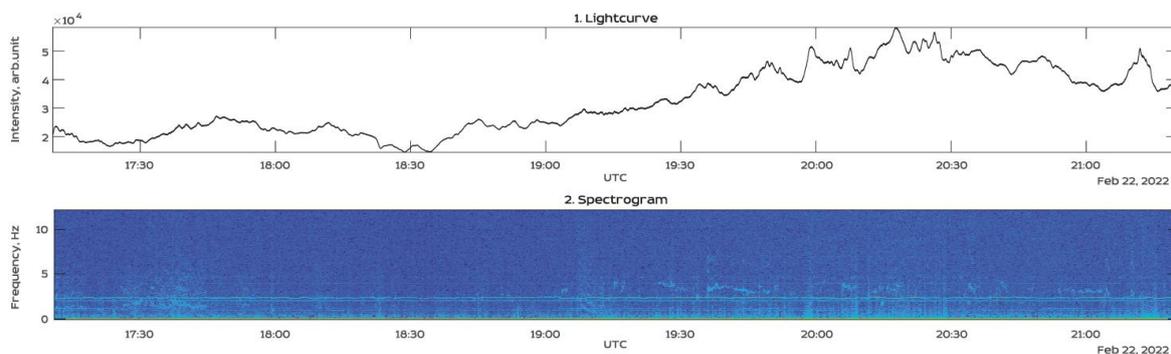


Рисунок 2. Событие 22.02.2022 (сверху вниз): 1 – осциллограмма суммарного сигнала матрицы детектора, 2 – спектрограмма данного сигнала.

На рис. 2 показаны суммарная кривая свечения по всему фотоприемнику (сверху) и спектрограмма (снизу) сигнала с 17 до 22 UTC. На спектрограмме сигнала хорошо различимы несколько частот, появляющиеся в разные промежутки времени:

1. 2.4 Гц – частота техногенной помехи пока невыявленного источника. Присутствует во всех событиях сезона 2021–2022, зарегистрированных детектором и наблюдается во всем поле зрения детектора, для удобства анализа данная частота удаляется из данных и далее не рассматривается;
2. Вариации частоты около 1–2 Гц приблизительно с 17:00 до 18:00, а также ее гармоники;
3. Вариации частоты около 3.5–4 Гц приблизительно с 19:00 до 21:00.

На рис. 3 приведены кеограммы оптической камеры для того же периода. На данных кеограммах видно наличие варьирующегося во времени неяркого излучения. К сожалению, условия наблюдения весьма облачные, однако через полупрозрачный двигающийся облачный покров видны звезды, слабые сияния.

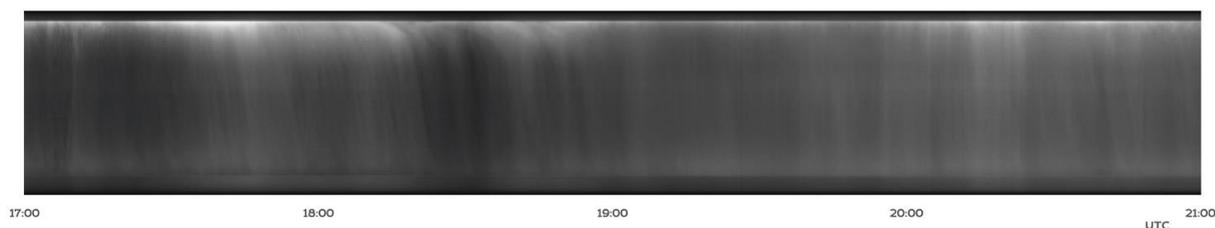


Рисунок 3. Кеограммы оптической камеры всего неба ПГИ с 17:00 до 21:00 часа 22.02.2022. Данные получены с сайта <http://auroga.pgja.ru/>.

Отдельно рассмотрен небольшой фрагмент события: с 17:25:00 до 17:28:30. Из фрагмента удален фоновый сигнал и проведено вейвлет-преобразование (рис. 4). Методика построения указанного изображения следующая:

1. При помощи фильтров, построенных на вейвлет-преобразовании из кривой свечения удаляется паразитная частота 2.4 Гц, а также частоты ниже 0.3 Гц, благодаря чему удаляется фоновый сигнал, то есть общий тренд сигнала. Таким образом получаем верхнее изображение рис. 4, где приведена кривая свечения, суммарная со всей матрице детектора, но с удаленным фоном и паразитной частотой.
2. Для полученного в п.1 сигнала проводится вейвлет-преобразование. Таким образом, получаем скалограмму, на которой отсутствуют 2.4 Гц и низкие частоты. Полученная скалограмма более наглядна и удобна для проведения анализа.

Так, на полученной описанным выше методом скалограмме (см. нижнюю панель рис. 4), наблюдаются частоты около 1–2 Гц, причем хорошо видно, что частота данных пульсаций изменяется в пределах от 1 Гц до приблизительно 1.7 Гц, монотонно увеличиваясь в течение двух минут, а затем спадая.

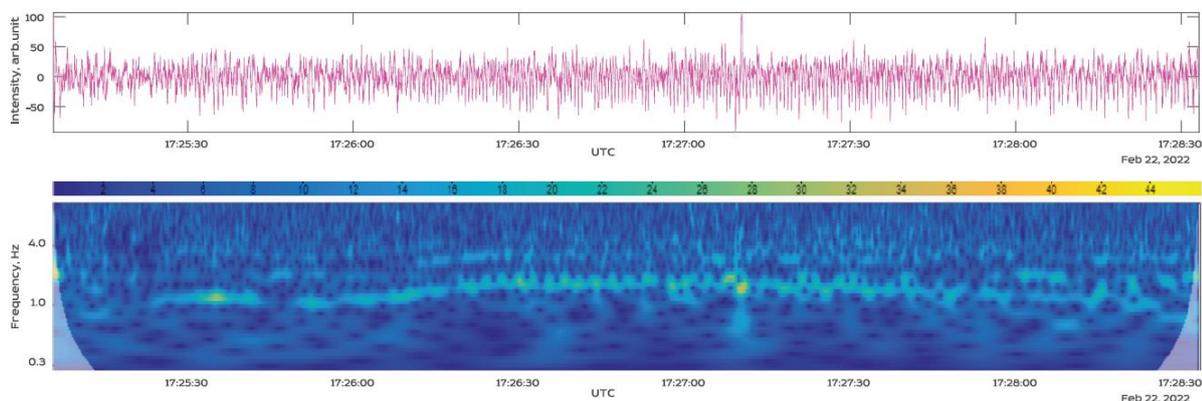


Рисунок 4. Фрагмент события 22.02.2022 с 17:25:00 до 17:28:30, сверху: осциллограмма суммарного сигнала матрицы детектора с удаленной помехой на частоте 2.4 Гц и фоном, снизу: скалограмма данного фрагмента сигнала.

Далее был рассмотрен фрагмент события с 19:23:30 до 19:29:00, где наблюдаются частоты около 3.5–4 Гц. На рисунке 5 приведена кривая свечения с вычтенным фоном (сверху) и скалограмма (снизу). На данном фрагменте хорошо различимы две основные особенности: 1) наличие «ступенек» – модуляции сигнала прямоугольной формы с минимальной длительностью фазы «включено»/«выключено» 3 с; 2) периодическое включение высокой частоты 3.5–4 Гц. На рисунке 5 зеленые участки кривой свечения, указывают на фазы включения «ступенек», а красные – фазы выключения. При помощи желтых областей отмечены моменты включения высокой частоты, которые определяются по скалограмме. Интересно, что для второй группы прямоугольных импульсов (с 19:27 по 19:28) наблюдается корреляция между фазами выключения импульсов с фазами включения пульсаций 3.5–4 Гц. Однако к концу этой последовательности синхронность двух эффектов нарушается при сохранении общей тенденции. Для первой группы прямоугольных импульсов данная корреляция не наблюдается.

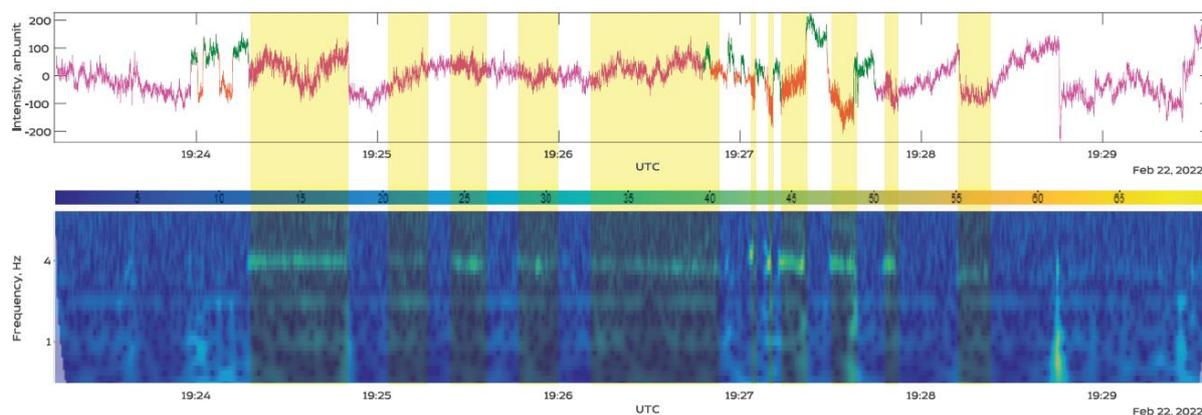


Рисунок 5. Фрагмент события 22.02.2022 с удаленной помехой на частоте 2.4 Гц и фоном, сверху: осциллограмма суммарного сигнала матрицы детектора для небольшого временного промежутка (с 19:24 до 19:29), снизу: скалограмма данного фрагмента сигнала. Желтые области отмечают фазы включения частот около 3.5–4 Гц. Зеленые участки указывают на фазы включения «ступенек», красные – на фазы выключения «ступенек».

Ширина фаз включения и выключения «ступенек» в обеих группах кратна одной и той же величине (~3 с) и напоминает последовательность цифровых импульсов. Возможные приборные эффекты были рассмотрены и исключены. Вероятным объяснением наблюдаемого эффекта может быть работа мощных радиопередающих устройств, вызывающих модуляцию свечения ионосферы. Однако эта гипотеза подлежит детальной проверке. Также не определена взаимосвязь прямоугольных импульсов и пульсаций свечения на частоте 3.5–4 Гц, которые иногда совпадают по времени, а иногда – нет.

Заключение

В работе рассмотрен частный случай регистрации очень слабого свечения аврорального неба в условиях низкой геомагнитной активности, слабой суббури. Этот случай обратил на себя внимание относительно длительным существованием квазипостоянной частоты в пульсациях излучения, причем в двух диапазонах: около 1 Гц и более 3 Гц. Это стало возможным благодаря использованию нового высокочувствительного оптического комплекса, установленного в обсерватории ПГИ «Верхнетуломская». На камерах всего неба эти сигналы отсутствуют в виду их малой чувствительности и недостаточного временного разрешения.

В обоих случаях наблюдается плавное монотонное изменение частоты пульсаций в сторону увеличения, а затем спада. Этот эффект ярче выражен для фрагмента с 17:25:00 до 17:28:30, когда наблюдались частоты около 1 Гц. Пульсации на частоте 3.5–4 Гц совпали с появлением более медленной компоненты модуляции излучения, причем наблюдающейся в виде последовательности «ступенек» на частоте 0.3 Гц, по форме импульса, напоминающих эпюры цифрового сигнала, свидетельствующие о резком включении и выключении источника излучения. На части осциллограммы видна синхронизация этих эффектов, что говорит об их возможной взаимосвязи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-62-00010 (<https://rscf.ru/project/22-62-00010>).

Список литературы

- [1]. Royrvik O., Davis T.N. (1977). Pulsating aurora: local and global morphology. *J. Geophys. Res.* 82, 29, 4720–4740. <https://doi.org/10.1029/JA082i029p04720>
- [2]. Hosokawa K., Miyoshi Y., Ozaki M., et al. (2020). Multiple time-scale beats in aurora: precise orchestration via magnetospheric chorus waves. *Sci. Rep.* 10, 3380. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59642-8>
- [3]. Safargaleev V., Sergienko T., Hosokawa K. et al. (2022). Altitude of pulsating arcs as inferred from tomographic measurements. *Earth Planets Space* 74, 31. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01592-8>
- [4]. Eric Grono and Eric Donovan (2018). Differentiating diffuse auroras based on phenomenology. *Ann. Geophys.* 36, 891–898. <https://doi.org/10.5194/angeo-36-891-2018>
- [5]. Demekhov A.G., and Trakhtengerts V.Y. (1994). A mechanism of formation of pulsating aurorae, *J. Geophys. Res.* 99(A4), 5831–5841. <https://doi.org/10.1029/93JA01804>
- [6]. Miyoshi Y., et al. (2015). Relation between fine structure of energy spectra for pulsating aurora electrons and frequency spectra of whistler mode chorus waves, *J. Geophys. Res. Space Physics* 120, 7728–7736. <https://doi.org/10.1002/2015JA021562>
- [7]. Fukizawa M., Sakanoi T., Miyoshi Y., Hosokawa K., Shiokawa K., Katoh Y., et al. (2018). Electrostatic electron cyclotron harmonic waves as a candidate to cause pulsating auroras. *Geophysical Research Letters* 45, 12,661–12,668. <https://doi.org/10.1029/2018GL080145>
- [8]. Klimov P.A., Sigaeva K.F. (2021). Fast near-UV radiation pulsations measured by the space telescope TUS in the auroral region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 220, 105672. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105672>
- [9]. Klimov P., Sharakin S., Belov A., Kozelov B., Murashov A., Saraev R., Trofimov D., Roldugin A., Lubchich V. (2022). System of Imaging Photometers for Upper Atmospheric Phenomena Study in the Arctic Region. *Atmosphere* 13, 1572. <https://doi.org/10.3390/atmos13101572>
- [10]. Belov A.A., Klimov P.A., Kozelov B.V., Barrillon P., Blin-Bondil S., Marszał W., Murashov A.S., Parizot E., Prévôt G., Roldugin A.V., Sharakin S.A., Szabelski J., Takizawa Y., and Trofimov D.A. (2022). Optical complex for the study of pulsating aurora with sub-millisecond time resolution on the basis of the Verkhnetulomsky observatory. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 235, 105905. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105905>