

УДК 524.1

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС НА ПОЛИГОНЕ “ВЕРХНЕТУЛОМСКИЙ”: НАУЧНАЯ АППАРАТУРА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2023 г. А. А. Белов^{1, 2}, П. А. Климов^{1, *}, Б. В. Козелов³, А. С. Мурашов¹,
А. В. Ролдугин³, Д. А. Трофимов^{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”, Апатиты, Россия

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

Поступила в редакцию 17.09.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

На полигоне “Верхнетуломский” Полярного геофизического института, расположенном внутри авроральной зоны, в дополнение к камере всего неба установлен новый фотометр с пространственным разрешением для исследования тонкой пространственно-временной структуры аврорального свечения. Описана научная аппаратура и случай одновременных наблюдений пульсирующих сияний с внутренней модуляцией в герцевом диапазоне.

DOI: 10.31857/S0367676522700430, EDN: AIBBSH

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее интересных разновидностей аврорального свечения являются пульсирующие полярные сияния. Они представляют собой модуляции интенсивности атмосферного свечения, происходят в основном в полудно-утреннем секторе MLT и как правило на фазе восстановления суббури [1, 2]. Пространственно-временная структура представляет собой пятна светимости с квазипериодическими изменениями яркости во времени. Различают “чистые” пульсации постоянного размера и формы, расширяющиеся пульсации, потоковые (streaming), распространяющиеся с севера на юг, вспыхивающие (flashing) и др. (см. например, обзор [3]). Размеры и формы пульсирующих авроральных форм существенно различаются. Например, пульсирующие авроральные дуги имеют ширину порядка 1–10 км и длину 1000 км; квазилинейные формы имеют ширину того же порядка, что и дуги, но длину порядка 100 км. Пульсирующие пятна, как правило, имеют размеры 10–200 км в поперечнике [4, 5].

Характерная высота пульсирующего свечения составляет около 100 км, что свидетельствует о том, что авроральные пульсации генерируются

высыпанием электронов с энергией 20–40 кэВ. Причиной этих высыпаний традиционно считается взаимодействие магнитосферных электронов с электромагнитными ОНЧ волнами [6, 7]. С другой стороны, в работе [8] продемонстрировано, что и пульсирующее полярное сияние, и микровсплески релятивистских электронов являются продуктами взаимодействия хорových волн с частицами, то есть микровсплески релятивистских электронов являются высокоэнергетическим хвостом пульсирующих электронов полярного сияния. Эти электроны высыпаются существенно глубже в атмосферу и повышают уровень ионизации до 70 км [9, 10].

Типичный период пульсаций светимости находится в диапазоне от нескольких до нескольких десятков секунд [11]. Это основные пульсации (main pulsations), развивающиеся по схеме включения/выключения. Частота основных пульсаций антикоррелирует с размером пульсирующих структур и коррелирует с интенсивностью излучения [12]. В некоторых случаях наблюдается так называемая “внутренняя модуляция”, представляющая собой более быстрые (около 3 Гц) пульсации на фазе “включено” основных пульсаций [13].

Для исследования внутренней модуляции пульсирующих сияний требуется временное разрешение выше, чем обладают большинство используемых в настоящее время авроральных камер, работающих в мониторинговом режиме. Полезную информацию о природе явления может также дать спектральная фильтрация эмиссий с коротким временем жизни, что повышает требования не только к временному разрешению, но и чувствительности регистратора.

В последнее время для измерения полярных сияний используются скоростные и высокочувствительные камеры, например, EMCCD (Electron multiplying charge-coupled device). В частности, такие камеры задействованы в проекте PWING для мультиспектральной высокоскоростной (100 Гц) регистрации мерцающего полярного сияния [14, 15]. Скоординированные наблюдения на спутнике Arase и проекта PWING за пульсирующим полярным сиянием [16] также обнаружили быстрые модуляции интенсивности во временном масштабе десятки миллисекунд и показали их возможную связь с последовательными дискретными пакетами хоровых волн и их внутренней структурой. Другим примером успешного использования EMCCD для наблюдения за авроральным свечением является проект Multispectral Observatory Of Sensitive EMCCD (MOOSE) [17, 18].

Для уменьшения теплового шума используемые в регистраторах ПЗС-матрицы должны иметь внутреннее охлаждение до -70°C . Другим возможным решением проблемы является использование многоанодных фотоэлектронных умножителей (МАФЭУ), имеющих высокую квантовую эффективность (около 40%), коэффициент усиления выше 10^6 и низкий уровень шума, практически не зависящий от температуры. Этот подход был реализован в разработанной нами аппаратуре, что позволило производить измерения в режиме счета фотонов с высоким временным разрешением.

ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ АППАРАТУРЫ

Для исследования тонкой пространственно-временной структуры свечения пульсаций в авроральной зоне, аппаратный комплекс радиофизического полигона Полярного геофизического института “Верхнетуломский” (<http://pgi.ru/kagin/?id=VTL>) дополнен высокочувствительным фотометром с пространственным разрешением на основе многоанодных фотоэлектронных умножителей, МАФЭУ [19]. Фотометр представляет собой простой линзовый телескоп. Оптическая система телескопа представлена прозрачной в УФ диапазоне линзой диаметром 5 см. Фокусное расстояние линзы — 15 см. Фотоприемник представлен матрицей из четырех МАФЭУ (16×16 пикселей, покрытых фильтрами

BG3). Фотометр направлен в зенит и имеет поле зрения около 20° в диаметре. Каждый пиксель имеет поле зрения 1.2° , что соответствует пространственному разрешению около 2 км на высоте порядка 100 км. Пространственное разрешение телескопа соответствует минимальным поперечным размерам пульсаций, а общее поле зрения — около 100 км на характерной высоте пульсаций.

Полоса пропускания фотоприемника 300–400 нм охватывает авроральные линии систем 1NG N2+ и 2PG N2, соответствующие переходам из состояний, имеющих малое время жизни ($<10^{-4}$ с). По этой причине имеет смысл полностью использовать временное разрешение фотоприемника.

МАФЭУ работает в режиме счета одиночных фотоэлектронов (эффективность регистрации фотонов $\sim 20\text{--}30\%$). Этот режим реализуется с помощью специализированной интегральной схемы SPACIROC-3 (Spatial Photomultiplier Array Counting and Integrating Read Out Chip), которая была разработана для орбитальных флуоресцентных детекторов космических лучей предельно высоких энергий [20]. SPACIROC-3 производит счет однофотоэлектронных импульсов во временном интервале 1 или 2.5 мкс, что соответствует предельному временному разрешению детектора. Такой режим работы позволяет добиться очень высокой чувствительности детектора по сравнению с другими используемыми для исследования полярных сияний камерами.

Также в приборе предусмотрена возможность спектрометрических измерений отдельными 16-ю одноканальными ФЭУ со светофильтрами, которая на данном этапе не используется.

Верхнетуломский полигон ПГИ расположен на Кольском полуострове ($68^{\circ}36'$ с.ш., $31^{\circ}47'$ в.д., $\text{MLT} = \text{UT} + 3$ ч) и оснащен ночной камерой наблюдения всего неба (all-sky camera, ASC). В ASC используется промышленная аналоговая панхроматическая видеокамера EVS VNC-748-H2 на базе 1/2-дюймовой ПЗС-матрицы Sony ICX-429ALL и объектива Fujinon F1.4/1.6–3.4 мм “рыбий глаз”. Аналоговый видеосигнал от ASC захватывается промышленной картой захвата видеоизображения. Используя синхронизацию по сигналу GPS PPS, карта захватывает и суммирует 25 кадров. Необработанные данные из ASC представляют собой изображения с временным разрешением 1 с и размером 376×288 пикселей по 2 байта на пиксель.

Для оценки общей геофизической обстановки также использовались данные камеры всего неба в обсерватории Баренцбург (арх. Шпицберген).

Фотометр был установлен 29.09.2021 и проводил непрерывные измерения вплоть до мая 2022 г. совместно с оптическими камерами. Рассмотрим одно из событий, зарегистрированных в это время.

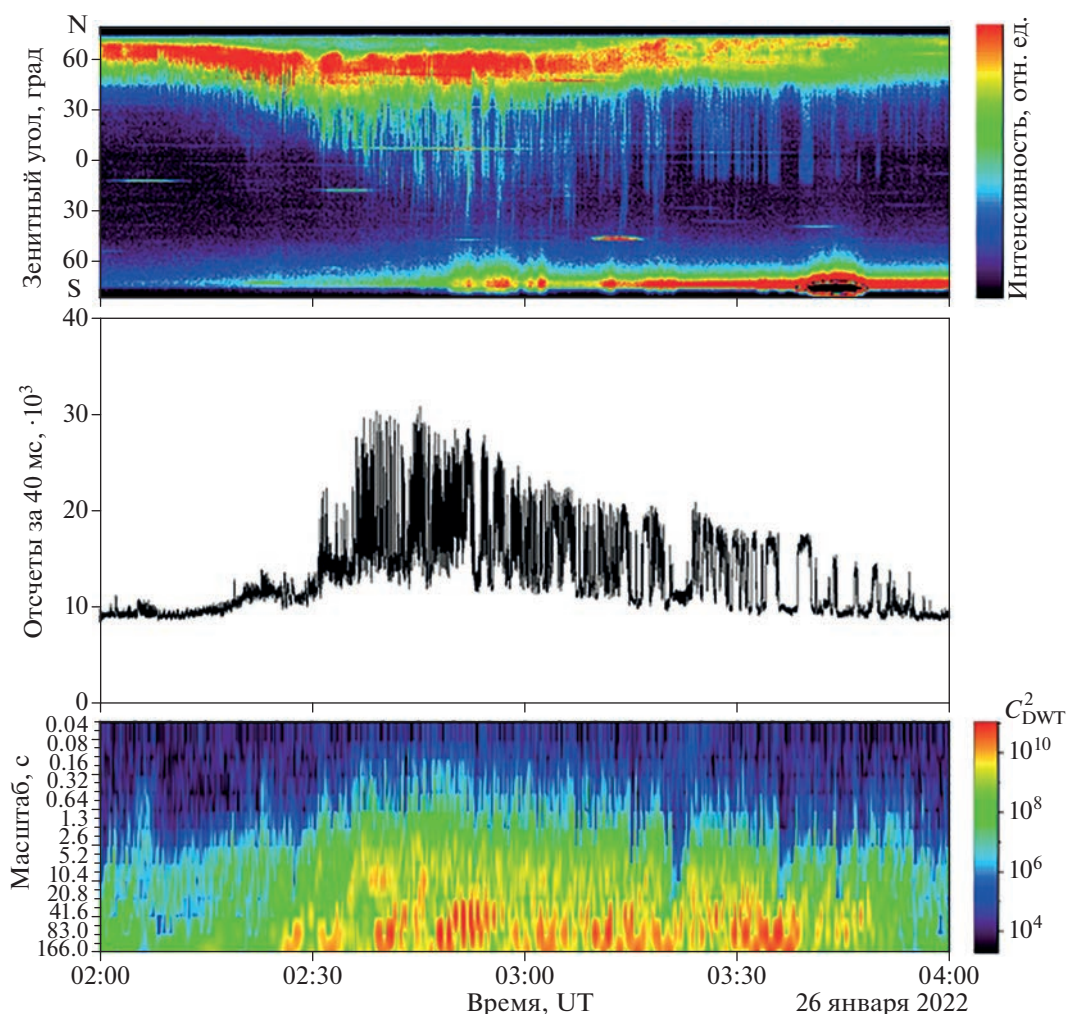


Рис. 1. Пульсирующие полярные сияния по наблюдениям на полигоне “Верхнетуломский”, сверху вниз: кеограмма по данным камеры всего неба; интенсивность свечения (число отсчетов за интервал измерения 40 мс) в поле зрения фотометра (канал вблизи зенита) в зависимости от времени; скалограмма (вейвлет-спектр мощности — квадрат значений детализирующих коэффициентов CDWT), полученная для временного ряда фотометра преобразованием с использованием вейвлетов Добеши 4 порядка (масштаб характеризует период колебаний).

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЯ СОБЫТИЯ 26.01.2022 (02:00–04:00 UT)

Геофизическая обстановка в ночь 25–26.01.2022 была умеренно возмущенная. До полуночи по UT по наземным магнитным и оптическим данным на Кольском полуострове (здесь не приведены) произошло несколько суббуревых активизаций, *SYM-H*-индекс был ~40 нТл, *AE* индекс в максимуме доходил до ~1000 нТл. После 00 UT активность на широтах ниже 70° с.ш. уменьшилась, *AE* < 50 нТл, *SYM-H* ~ 20 нТл. Однако по данным камеры всего неба на Шпицбергене (здесь не показаны), авроральная активность на широтах южнее 78° с.ш. в виде активных лучистых дуг оставалась значительной. После 01:40 UT *AE* увеличился до 150 нТл, и около 01:50 UT наблюдалась яркая N–S дуга, что может быть признаком инъекции плаз-

мы из дальних областей плазменного слоя магнитосферного хвоста к Земле [21].

На рис. 1 приведены результаты регистрации пульсирующих сияний 26.01.2022, с 02:00 до 04:00 UT на полигоне “Верхнетуломский”. Регистрируемое в течение этого интервала полярное сияние классифицируется как потоковое (streaming) пульсирующее сияние [3], при котором появляется серия пятен, которые быстро удаляются от места появления и исчезают. Места появления и направление смещения выглядят хаотично. Кеограмма дает представление о динамике свечения вдоль меридиана, проходящего через зенит ASC. Интенсивность свечения передается в псевдоцвете: по мере усиления свечения окраска меняется от синего до темно-коричневого через зеленый, желтый и красный. Яркая линия вблизи южного

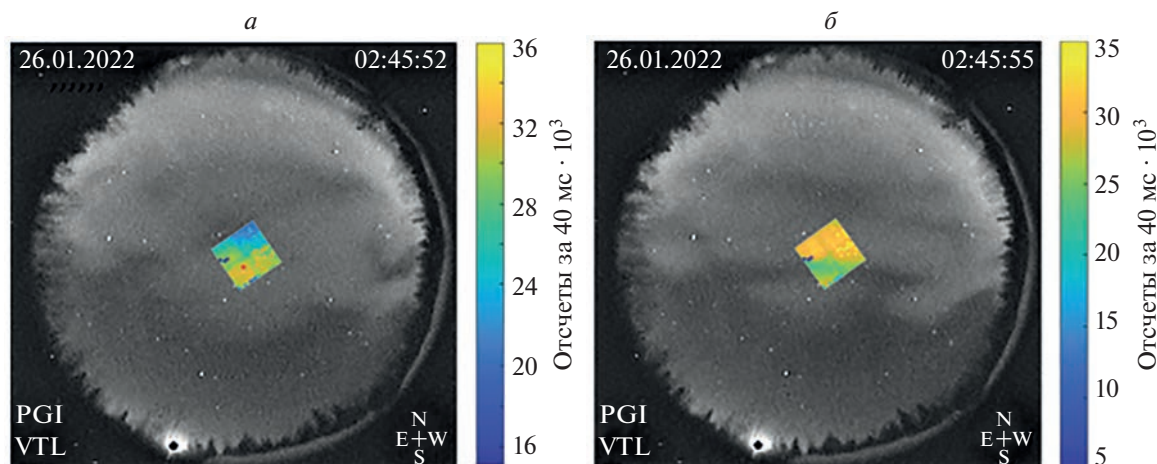


Рис. 2. Снимок камеры всего неба, совмещенный с одновременным изображением матрицы МАФЭУ фотометра: для 02:45:52 UT, выделенный для дальнейшего анализа фотометр помечен красной звездочкой (а); для 02:45:55 UT (б).

горизонта с максимумом около 03:45 UT — это прохождение Луны, прерывается из-за деревьев вблизи горизонта. Четкие горизонтальные отрезки на кеограмме — прохождение ярких звезд. На севере весь интервал наблюдается полоса полярных сияний, причем южная кромка полосы сияний постепенно спускается к югу. Узкие вертикальные отрезки на кеограмме — следы пульсирующих сияний. Смещение полосы к югу сопровождалось развитием небольшой, до 100 нТл, отрицательной вариации (“бухты”) в H -компоненте магнитного поля в обсерваториях Лопарская и Ловозеро, а также появлением шума на частотах ниже 0.7 Гц по данным индукционных магнитометров в Ловозеро и Верхнетуломском (не приведены).

На средней панели показана интенсивность свечения в поле зрения фотометра (канал вблизи зенита) в зависимости от времени. В течение полутора часов в поле зрения фотометра наблюдается быстропеременное пульсирующее свечение с варьирующейся амплитудой и частотой. Резкие увеличения амплитуды сигнала обусловлены усилением пульсирующих сияний, наблюдаются во время смещения полосы пульсирующих пятен от севера к зениту.

На нижней панели приведена скалограмма, полученная для временного ряда этого фотометра вейвлет-преобразованием с использованием вейвлетов Добеши 4 порядка. Из нее видно, что постоянных доминирующих периодов в пульсациях интенсивности не наблюдается.

Рассмотрим детальнее интервал 02:45–02:48 UT. Из данных камеры всего неба (см. кеограмму на верхней панели рис. 1) видно, что в поле зрения в течение всего интервала появляются и перемещаются пятна сияний, без сохранения какой-либо пространственной структуры от пятна к пятну.

Примеры кадров камеры всего неба с наложением на них одновременных данных телескопа приведены на рис. 2. Видно соответствие наблюдаемых пространственных структур свечения. Для дальнейшего анализа выбран один пиксель из матрицы МАФЭУ, помеченный на рис. 2а красной звездочкой (немного ниже центра на изображении).

Верхняя панель рис. 3 показывает сравнение осциллограмм фотометра и соответствующей ему суммы пикселей камеры всего неба в интервале 02:45–02:48 UT. Отчетливо видно совпадение медленной вариации излучения и более высокочастотная модуляция сигнала, измеряемая фотометром. На нижней панели приведена скалограмма, показывающая, что характерные периоды основных пульсации (наибольшей амплитуды) составляют 5–20 с. Более короткопериодные составляющие имеют тенденцию появляться в максимумах основных пульсации (фаза “включено”), а в минимумах (фаза “выключено”) они значительно меньше. Аналогичные закономерности видны на рис. 4 для интервала 03:00–03:03 UT.

Для сравнения спектрального состава пульсаций, интервал наблюдений фотометра от 02:36 до 03:15 UT, когда наблюдались наиболее сильные пульсации, был дополнительно обработан следующим образом:

- для выделения фаз пульсаций вычтено среднее значение и линейный тренд;
- точки с амплитудой меньше нуля отнесены к фазе “выключено”;
- точки с амплитудой больше нуля — к фазе “включено”;
- вычислены FFT спектры мощности по этим наборам;

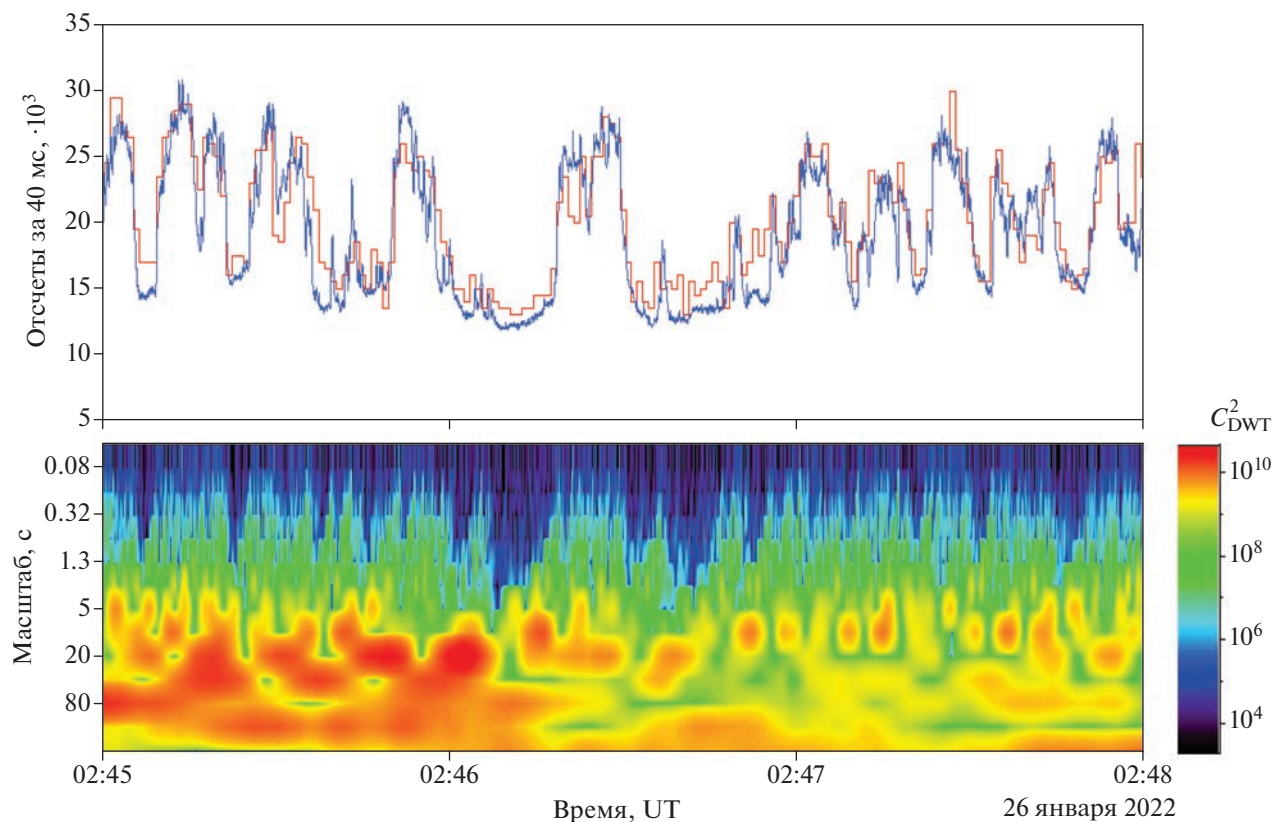


Рис. 3. Пульсирующие полярные сияния 28 января 2022 г., интервал 02:45–02:48 UT. Верхняя панель — сравнение осциллограмм фотометра (синяя линия) и соответствующего пикселя камеры всего неба (красная линия). Нижняя панель — вейвлет-спектр мощности (квадрат значений детализирующих коэффициентов), полученный для временного ряда фотометра.

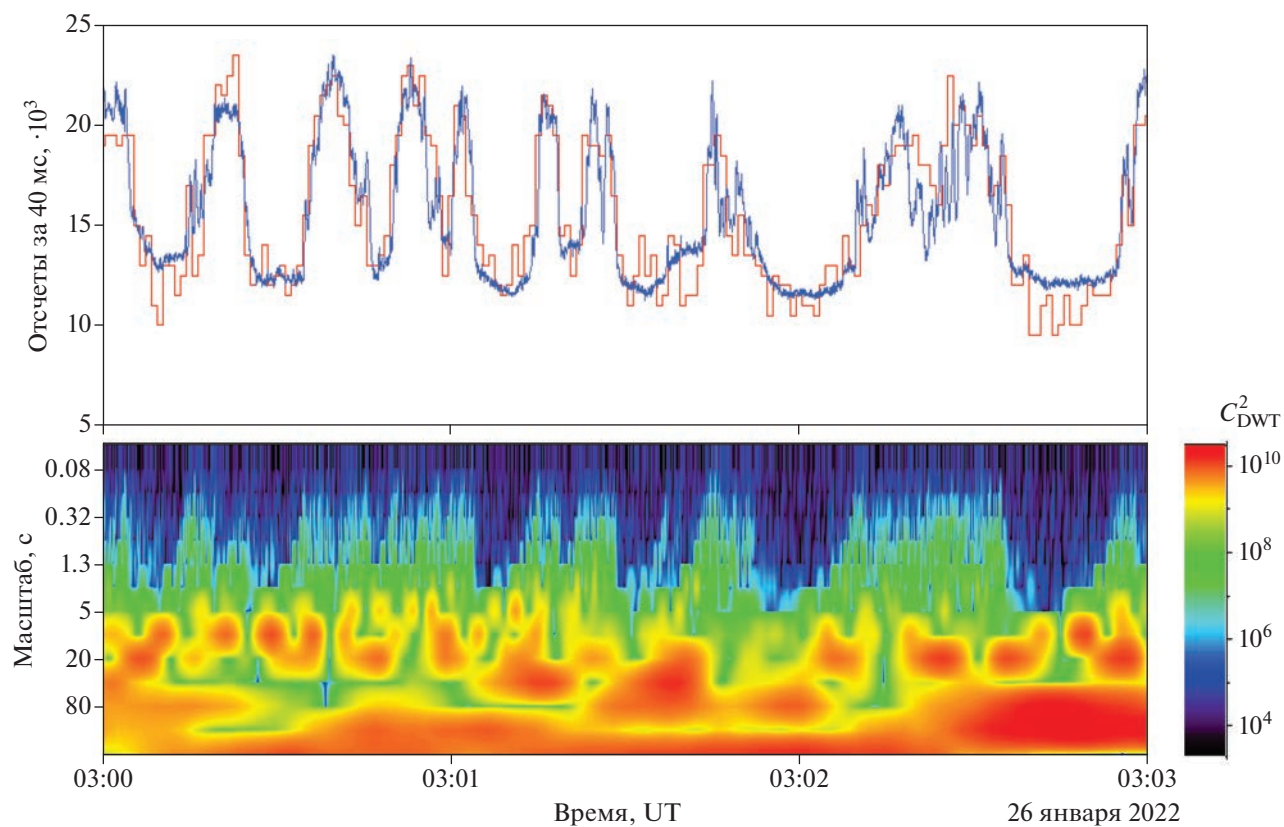


Рис. 4. То же, что на рис. 3 для интервала 03:00–03:03 UT.

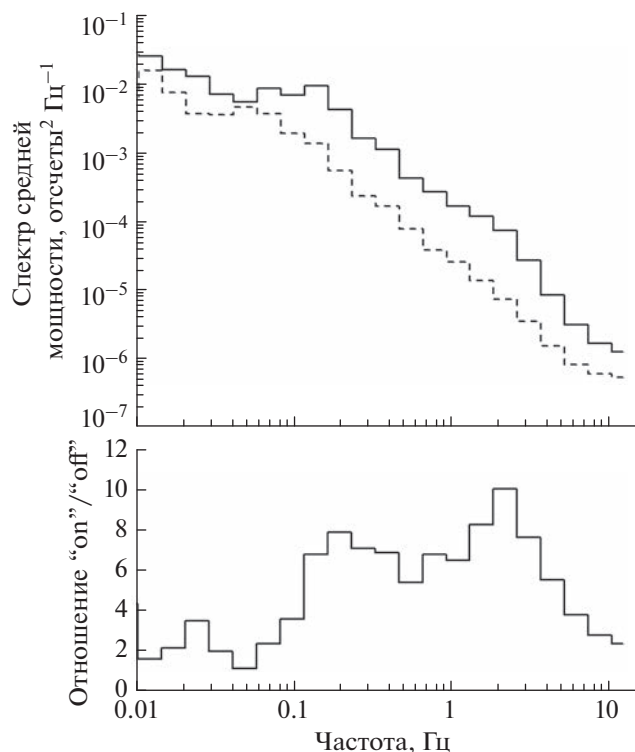


Рис. 5. Анализ изменения спектра во время пульсаций. Верхняя панель — усредненные FFT спектры мощности в спектральных диапазонах для фаз “включено” (сплошная линия) и “выключено” (пунктир). Нижняя панель — отношение компонент спектра фазы “включено” к “выключено”.

— для сглаживания спектр усреднен в спектральных компонентах с шагом $\sqrt{2}$ по частоте.

Результат обработки приведен на рис. 5. На верхней панели приведены усредненные спектры мощности компонент для фаз “включено” (сплошная линия) и “выключено” (пунктир). Для фазы “выключено” спектр непрерывный в интервале 0.05–12 Гц, без очевидных максимумов, близок к виду f^{-2} , где $f = 1/T$, f — частота, T — период пульсаций. Для фазы “включено” амплитуда компонент спектра в этом диапазоне выше, форма спектра искажается, хотя спектр остается ниспадающим с частотой, на нем не возникает явных пиков.

На нижней панели приведено отношение компонент спектра фазы “включено” к “выключено”. Видны следующие особенности:

- в полосе 0.14–0.4 Гц наблюдается широкий пик со средним значением в районе 7 и с максимумом ~ 8 на частоте 0.2 Гц;

- выше 1 Гц пик в полосе 1.5–3 Гц с хорошо выраженным максимумом порядка 10 на частоте 2.2 Гц.

Первый пик связан с основной частотой пульсаций (удвоенной за счет процедуры обработки сигнала), в то время как второй — с высокочастотной модуляцией свечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан случай одновременного наблюдения пульсирующих сияний при помощи нового фотометра на основе матрицы ФЭУ и камеры полного обзора неба, установленных на полигоне “Верхнелукомский”. Сияния имели форму дрейфующей с севера на юг полосы, заполненной пульсирующими пятнами. Интервал относится к моменту активизации сияний, связанной, возможно, с инъекцией плазмы из удаленных частей плазменного слоя по направлению к Земле (в область более низких широт в проекции на ионосферу), признаком которой можно считать появление N-S структуры в поле зрения камеры в Баренцбурге.

Регистрируемое в области совместных наблюдений свечение можно классифицировать как потоковое (streaming) пульсирующее сияние, при котором появляющиеся пятна быстро смещаются от места появления и исчезают. Места появления и направление смещения выглядят хаотично. Постоянных доминирующих периодов в пульсациях интенсивности в диапазоне от единиц до сотен секунд не наблюдалось, что могло быть обусловлено, например, быстрым движением структуры через поле зрения фотометра.

Высокоскоростная регистрация новым фотометром позволила выявить повышение амплитуды колебаний в диапазоне 1–10 Гц с максимумом на частоте около 2.2 Гц на фазе “включено” основных пульсаций. Результат согласуется с наблюдениями других авторов (см., например, [13]).

Анализ спектра флуктуаций светимости в интервале 0.05–12 Гц (внутренняя модуляция) показал, что на фазе “выключено” спектр близок к виду f^{-2} без очевидных максимумов. Для фазы “включено” форма спектра искажается, хотя спектр остается ниспадающим с частотой, а интенсивность на частотах более 1 Гц на порядок выше, чем на фазе “выключено” (см. нижнюю панель рис. 5). Последнее поддерживает сделанный выше вывод о существенной амплитуде внутренней модуляции сигнала именно на фазе “включено” основных пульсаций. Появление высокочастотной модуляции на стадии “включено” отмечалось ранее применительно к другим формам пульсирующих сияний ([12, 13, 16, 22]). В данном случае высокочастотная модуляция зафиксирована в полосе потокового пульсирующего сияния.

Отсутствие явных периодов в спектре пульсаций и степенной вид спектра может свидетельствовать о формировании наблюдаемой последова-

тельности пульсаций в режиме перемежаемости “включено—выключено”, ранее предложенной для объяснения последовательности хоровых элементов [23, 24]. Часто наблюдаемый при активизации сияний переход от хаотического, псевдопериодического к более регулярному периодическому режиму также укладывается в это объяснение.

Усиление шума на частотах ниже 0.7 Гц в данных индукционного магнитометра в Верхнетуломском и оптические пульсации этого частотного диапазона могут быть связаны между собой. Вопрос требует отдельного рассмотрения, что выходит за рамки данного исследования.

Таким образом, установленный на полигоне “Верхнетуломский” высокочувствительный фотометр на основе матрицы многоанодных фотоумножителей с большим временным разрешением существенно дополнил возможности аврального комплекса в высоких широтах РФ.

Авторы благодарят коллаборацию JEM-EUSO за возможность использования технологий коллаборации, а также рецензента за критические замечания, полезные обсуждения и дополнения.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-62-00010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Johnstone A.D.* // *Nature*. 1978. V. 274. No. 5667. P. 119.
2. *Lessard M.R.* // *Auroral Phenom. Magnetosphere. Process. Earth Other Planets*. 2012. V. 197. P. 55.
3. *Nishimura Y., Lessard M.R., Katoh Y. et al.* // *Space Sci. Rev.* 2020. V. 216. P. 4.
4. *Royrvik O., Davis T.N.* // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82. No. 29. P. 4720.
5. *Balan N., Shiokawa K., Otsuka Y. et al.* // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2010. V. 115. No. A2. Art. No. A02304.
6. *Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Y.* // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 1994. V. 99. No. A4. P. 5831.
7. *Kasahara S., Miyoshi Y., Yokota S. et al.* // *Nature*. 2018. V. 554. P. 337.
8. *Miyoshi Y., Saito S., Kurita S. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. Art. No. e90360.
9. *Tesema F., Partamies N., Nesse Tyssoy H., McKay D.* // *Ann. Geophys.* 2020. V. 38. P. 1191.
10. *Miyoshi Y., Oyama S., Saito S. et al.* // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015. V. 120. No. 4. P. 2754.
11. *Yamamoto T.* // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 897.
12. *Samara M., Michell R.G.* // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2010. V. 115. No. A9. Art. No. A00F18.
13. *Nishiyama T., Sakanoi T., Miyoshi Y. et al.* // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 3514.
14. *Kataoka R., Miyoshi Y., Sakanoi T. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. No. 14. Art. No. L14106.
15. *Shiokawa K., Katoh Y., Hamaguchi Y. et al.* // *Earth Planets Space*. 2017. V. 69. No. 1. P. 1.
16. *Ozaki M., Shiokawa K., Miyoshi Y. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. No. 22. P. 12.
17. *Michell R.G., Grydeland T., Samara M.* // *Ann. Geophys.* 2014. V. 32. No. 10. P. 1333.
18. *Michell R.G., Samara M.* // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015. V. 120. No. 10. P. 9192.
19. *Belov A.A., Klimov P.A., Kozelov B.V. et al.* // *J. Atm. Solar–Terr. Phys.* 2022. Art. No. 105905.
20. *Blin-Bondil S., Dulucq F., Rabanal J. et al.* // *Proc. 3rd Int. Conf. TIPP. (Amsterdam, 2014)*. P. 2014.
21. *Lyons L.R., Nagai T., Blanchard G.T. et al.* // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 1999. V. 104. No. A3. P. 4485.
22. *Safargaleev V., Sergienko T., Hosokawa K. et al.* // *Earth Planets Space*. 2022. V. 74. P. 31.
23. *Козелов Б.В., Тумова Е.Е., Любчик А.А. и др.* // *Геомагн. и аэроном.* 2003. Т. 43. № 5. С. 635.
24. *Trakhtengerts V.Y., Demekhov A.G., Titova E.E. et al.* // *Phys. Plasmas*. 2004. V. 11. No. 1. P. 1345.

Upgraded optical complex in ‘Verkhnetulomsky’ observatory: equipment and first results

A. A. Belov^{a, b}, P. A. Klimov^{a, *}, B. V. Kozelov^c, A. S. Murashov^a, A. V. Roldugin^c, D. A. Trofimov^{a, b}

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

^b *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Russia*

^c *Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

^{*}*e-mail: pavel.klimov@gmail.com*

A new photometer with spatial resolution was installed in addition to the all-sky camera at the “Verkhnetulomsky” observatory of the Polar Geophysical Institute, located inside the auroral zone, to study the fine space-time structure of the auroral luminescence. We described the scientific equipment and the case of simultaneous observations of pulsating auroras with internal modulation in the hertz range.