

УДК 523.4–854

МИКРОВСПЛЕСКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АВРОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ ПО ДАННЫМ МНОГОКАНАЛЬНОГО ИЗОБРАЖАЮЩЕГО ФОТОМЕТРА

© 2024 г. К. Д. Шелканов^{1, 2, *}, А. А. Белов^{1, 2}, П. А. Климов¹,
В. Д. Николаева¹, Р. Е. Сараев^{1, 2}, С. А. Шаракин¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

*e-mail: shchelkanov.kd18@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 14.08.2023

После доработки 21.09.2023

Принята к публикации 22.09.2023

Осенью 2021 г. в обсерватории «Верхнетуломская» Полярного геофизического института (ПГИ) был установлен многоканальный изображающий фотометр системы RAIPS. В течение первого сезона работы (2021 / 2022 гг.) измерения проводились в течение 163 ночей в трех режимах, отличающихся временным разрешением: 2.5, 320 мкс и 41 мс. Высокое временное разрешение позволяет исследовать тонкую временную структуру свечения, представляющую собой короткие (менее 1 с) всплески ультрафиолетового излучения (УФ), т.н. «микровсплески», которые могут быть одиночными или следовать сериями. Обнаружены и проанализированы длительные серии микровсплесков, зарегистрированные 27–29.XI.2021. Показано, что серии всплесков имеют сложную временную структуру, отдельные всплески имеют несколько пиков с интервалами в 100–400 мс, интервалы между всплесками составляют порядка 1 с и появляются пачками длительностью от нескольких секунд до минут. Серии возникают как в спокойных геомагнитных условиях, так и во время суббурь, частота и амплитуда всплесков во втором случае в разы больше.

DOI: 10.31857/S0023420624040017, EDN: JJGTVO

ВВЕДЕНИЕ

Микровсплески релятивистских электронов (МРЭ) – интенсивные кратковременные высыпания релятивистских электронов (>1 МэВ) продолжительностью менее одной секунды из внешнего радиационного пояса Земли в атмосферу [1]. Впервые они были зарегистрированы в баллонных экспериментах, где было показано, что МРЭ возникают не по одиночке, а представляют собой серию нескольких вспышек [2].

Исследования микровсплесков производят также со спутников. Наблюдения, осуществляемые на борту космических аппаратов, обладают несомненным преимуществом: они позволяют получать длительные временные ряды данных вне зависимости от погодных и прочих условий проведения эксперимента, а также позволяют исследовать их глобальное распределение по частоте регистрации и положению в магнитосфере Земли. Спутниковые исследования МРЭ были проведены в проекте *SAMPEX* (англ. *Solar Anomalous Magnetospheric Particle Explorer*) [3]. Космический аппарат был выведен на орбиту в 1992 г. и за 20 лет измерений зарегистрировал около 200 тысяч МРЭ [4]. Такой

объем данных позволил проанализировать распределение частоты регистрации микровсплесков в зависимости от географических координат, а также получить их распределение по геомагнитной широте (по L -оболочке геомагнитного поля, характеризующей область возникновения и регистрации МРЭ). Более 99% микровсплесков происходит между $L = 3$ и $L = 8$. Этот диапазон включает внешний радиационный пояс Земли. Средняя частота возникновения МРЭ на земном шаре – 1 событие в 1000 с, пик частоты приходится на 07:00–08:00 MLT и составляет примерно одно событие каждые сто секунд [5; 6]. Была произведена оценка длительности МРЭ. Самые быстрые зарегистрированные МРЭ продолжались 100 мс. Однако эта величина скорее определяется временным разрешением прибора и возможно, существуют более короткие микровсплески [6]. В работе [7], было произведено уточнение продолжительности МРЭ. Было показано, что 50% зарегистрированных МРЭ имели длительность 66–142 мс. Также была обнаружена корреляция длительности микровсплесков с L -оболочкой, на которой они были обнаружены: медианная длительность возрастала от 85 до 106 мс

между $L = 4$ и $L = 5.5$, и уменьшалась до 90 мс при $L = 7$.

Сопоставление данных измерений спутника *SAMPEx* и сети наземных камер всего неба THEMIS (*англ.* Time History of Events and Macroscale Interactions During Substorms) [8], установленной в Канаде показало, что частота возникновения МРЭ коррелирует с пульсирующими полярными сияниями (ППС), вызываемыми электронами с энергией порядка 3–10 кэВ [9]. Однако, временные характеристики камер THEMIS (1 с экспозиции и 2 с обработки кадра) не позволяют подробно изучить временную структуру оптических сигналов, вызываемых МРЭ.

При попадании в атмосферу Земли релятивистские электроны, взаимодействуя с молекулами газов воздуха, производят флуоресцентное свечение. Основными компонентами, определяющими интенсивность такого свечения являются первая положительная (N_2 1P), вторая положительная (N_2 1P) и первая отрицательная (N_2^+ 1N) системы азота. Это было показано при моделировании прохождения пучков релятивистских электронов через атмосферу [10, 11].

Энергии у электронов ППС и МРЭ значительно различаются и, соответственно, свечение, вызываемое ими, должно происходить на разных высотах. Тогда как ППС имеют характерную высоту 100–110 км, МРЭ же могут быть обнаружены на высотах 70 км и ниже [12]. Изменение глубины ионизации, зарегистрированное по данным радара некогерентного рассеяния EISCAT (*англ.* European Incoherent Scatter Radar), подтверждает эти модельные оценки [13, 14, 15].

Временные флуктуации потоков электронов высоких энергий до 580 кэВ в области ППС одновременно с низкими энергиями порядка 10 кэВ обнаружены в ходе эксперимента LAMP (*англ.* Loss through Auroral Microburst Pulsation) [16]. Регистрирующая аппаратура была установлена на ракетном зонде, что позволило производить измерения непосредственно внутри области свечения [17].

Релятивистские электроны могут высыпаться под действием ультранизкочастотных волн (УНЧ), традиционно ассоциируемых с ускорением частиц радиационных поясов, что подтверждается моделированием на основе результатов измерения тормозного рентгеновского излучения в ходе баллонного эксперимента MINIS2005 г. [18]. Вариации темпа счета рентгеновского излучения высыпавшихся релятивистских электронов, измеренного в баллонном эксперименте BARREL (*англ.* Balloon Array for Radiation belt Relativistic Electron Losses) [19], происходят на временных масштабах УНЧ $Pc3$ – $Pc5$ пульсаций, что соответствует частотному диапазону от 2 МГц до 0.1 Гц [20].

Практически во всех экспериментах исследования микровсплесков релятивистских электронов

проводились либо с помощью аппаратуры космического базирования или аэростатов и зондов, либо с помощью панорамных камер с низкими временным разрешением, работающих в оптическом диапазоне. Фотометр системы PAIPS, установленный в авроральной зоне, производит измерения интенсивности свечения атмосферы Земли с высоким (41 мс) временным разрешением и позволяет регистрировать всплески УФ-излучения, которые могут быть ассоциированы с высыпаниями релятивистских электронов. В настоящей работе произведен отбор УФ-микровсплесков, проведен анализ их временных структур, условий наблюдения, времени регистрации и обсуждается их возможная связь с МРЭ.

ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ

Широкоугольный изображающий фотометр

Широкоугольный фотометр системы Pulsating Aurora Imaging Photometer System (PAIPS) был установлен в Верхнетуломской обсерватории ПГИ (Мурманская область, 68° 35' 29.61" с.ш., 31° 45' 19.18" в.д.) 29.IX.2021. Фотометр представляет собой компактный телескоп с линзовой оптической системой диаметром 5 см и матрицей четырех многоанодных фотоэлектронных умножителей (МАФЭУ), размером 8×8 пикселей каждый, работающих в режиме счета фотонов, в качестве фотоприемника, что обеспечивает высокую чувствительность детектора.

Перед матрицей МАФЭУ установлены светофильтры, ограничивающие спектральную полосу пропускания в области ближнего УФ (300...400 нм, «быстрые» линии свечения молекулярного азота). Угол обзора телескопа составляет около 20°, угловое разрешение составляет 1.1° (~2 км на высоте 100 км), апертура – 19.6 см². Подробное описание прибора приведено в публикации [21].

В сезоне 2021/2022 велась непрерывная запись интенсивности свечения неба в течение 163 ночей в трех временных разрешениях: 2.5, 320 мкс и 41 мс. Временное разрешение в 41 миллисекунду позволяет регистрировать и исследовать временную структуру отклика атмосферы на микровсплески потоков электронов, характерная длительность которых составляет менее 100 мс.

Алгоритм поиска микровсплесков

Для предварительного поиска микровсплесков был предложен и реализован алгоритм, основанный на простом пороговом триггере, позволяющий отбирать события по амплитуде и длительности всплеска в сигнале. Поиск импульсов проводится по суммарному сигналу центральных 36 каналов (6×6) каждого МАФЭУ. Это связано

с тем, что краевые пиксели МАФЭУ обладают повышенными шумами.

Данные проходят предварительную предобработку. Для каждой ночи наблюдений из рассмотрения убираются области заката и восхода, так как на фоне рассеянного солнечного света искомые события трудно различимы. Затем данные разбиваются на небольшие пакеты по 5 с, в течение которых изменение базового уровня (фонового излучения) мало и может быть аппроксимировано линейно и вычтено. За базовый уровень, относительно которого затем анализируются пики, принимается минимальное значение скользящего среднего с окном в 16 временных интервалов измерений. После предобработки проводится отбор всплесков по двум критериям: амплитуда пика, длительность пика (ширина на полувысоте). Для отбора по амплитуде используется пороговое значение, которое выбрано равным 4σ от базового уровня сигнала.

Для отбора по длительности используются два параметра — минимальная и максимальная длительность. Ограничения по длительности нужны, чтобы в выборку не попали однократные всплески и, наоборот, длительные возрастания от других явлений (проход облака в поле зрения, пролет метеора и др.). В качестве минимальной и максимальной длительности, на основе статистики микровсплесков проекта *SAMPEX* выбраны следующие значения: 60 и 160 мс соответственно.

Этот алгоритм был применен ко всей базе данных, проанализирована эффективность его работы. Оказалось, что результат сильно зависит от настроечных параметров. При малых величинах порога отбираются шумовые импульсы, а при больших — пропускается много полезных событий. Поэтому, такой предварительный отбор был использован для определения интервалов с большим количеством микровсплесков, которые затем отсматривались и анализировались отдельно (в частности, серии 27–29.XI.2021, которые будут подробно описаны ниже). Также из базы данных были исключены события, связанные с пролетами метеоров, спутников и самолетов. Эти события обнаруживались визуально по характерным пространственно-временным паттернам. При регистрации метеора наблюдается короткий колоколообразный пик с характерной пространственной структурой на матрице фотоприемника в виде узкого трека. Спутник пролетает через все поле зрения, оставляя трек с квази-постоянной интенсивностью свечения. Попадание самолета в поле зрения характеризуется наличием эквидистантных коротких пиков на кривой свечения, связанных с миганием бортовых огней. Примеры событий показаны на рис. 1б–г. Другие примеры с подробным анализом можно найти в работе [21]. На рис. 1а показан пример УФ-микровсплесков, которые существенно отличаются как по временной,

так и пространственной структуре сигнала: видна последовательность импульсов разнообразной формы, а на карте каналов сигнал распределен по всему полю зрения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведет анализ данных по наблюдениям сезона 2021 / 2022. По описанному выше алгоритму отобраны события, по своей временной структуре схожие с событиями МРЭ, регистрируемыми аппаратурой на спутнике *SAMPEX*. События представляют собой последовательность коротких всплесков излучения, которые происходят по всему полю зрения детектора. Детальный статистический анализ выборки не был проведен, поскольку существует сильная зависимость от параметров алгоритма. Но обратим внимание на несколько особенностей.

В условиях низкой освещенности отбирается существенно больше событий. Это связано с эффективностью обнаружения: при ярком фоновом свечении соотношение сигнал / шум существенно уменьшается, и обнаружение микровсплесков становится менее эффективным. Регистрируются лишь отдельные события. Пороговый эффект обнаружения всплесков не анализируется в настоящей работе, но при дальнейшей статистической обработке всех данных его необходимо учесть для корректного расчета времени экспозиции.

Практически всегда всплески регистрируются сериями от нескольких минут до часов. Три такие длительные серии наблюдались в ходе ночных наблюдений 27–28.XI.2021, 28–29.XI.2021 и 29–30.XI.2021.

Для этих дней была проанализирована геомагнитная обстановка. На рис. 2 показаны вариации индекса геомагнитной активности *AE*. В рассматриваемый период наблюдалась последовательная интенсивность геомагнитных суббурь различной интенсивности от 100 до 600 нТл. Красным цветом обозначены периоды регистрации серий УФ-микровсплесков. 27 ноября серия микровсплесков происходила в спокойных геомагнитных условиях (*AE*-индекс не превышает 50 нТл). 28 ноября серия микровсплесков была зарегистрирована одновременно со слабой суббурей ($AE \approx 100$ нТл), однако в интенсивности свечения по фотометру отсутствует рост фонового уровня свечения, что свидетельствует о том, что бухта в *H*-компоненте геомагнитного поля, зарегистрированная на магнитовариационной станции, находящейся на ночной стороне, и давшая вклад в вариацию индекса *AE* не повлияла на геомагнитную обстановку в Верхнетуломской обсерватории, и данный период можно рассматривать как геомагнитно-спокойный. В свою очередь, 29 ноября во время регистрации микровсплесков происходило повышение *AE*-индекса до 300 нТл, и микровсплески наблюдались как во время взрывной фазы суббури, так и на фазе восстановления.

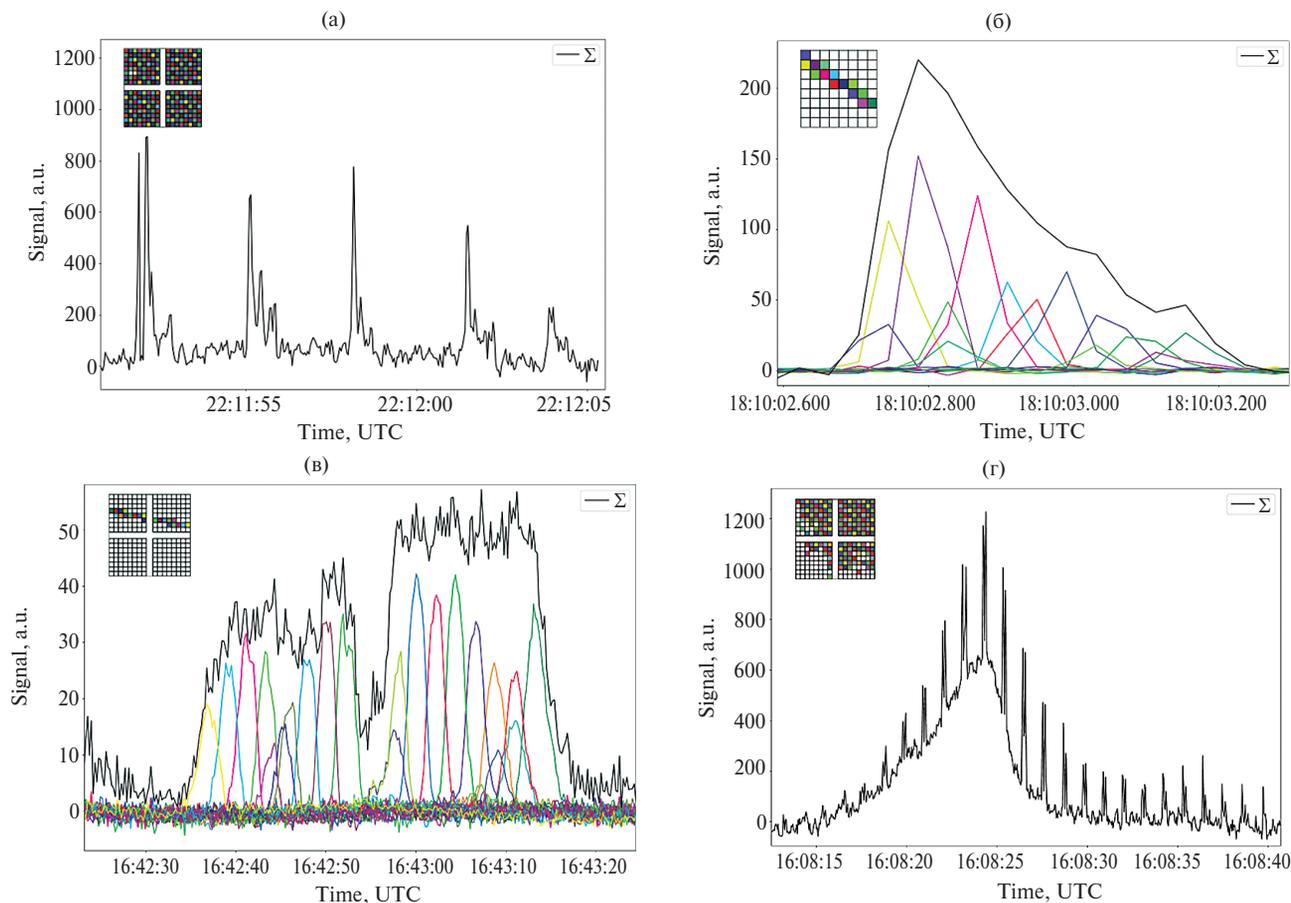


Рис. 1. (а) УФ-микровсплеск (вставка – карта сработавших каналов); (б) осциллограммы метеорного события, цветом показаны разные каналы, черная линия – интегральная кривая свечения, вставка – карта сработавших каналов; (в) осциллограммы для пролета спутника (цветные линии – сигнал в пикселях, черная – интегральная кривая свечения); (г) осциллограмма пролета самолета с характерными двухпиковыми всплесками сигнальных огней.

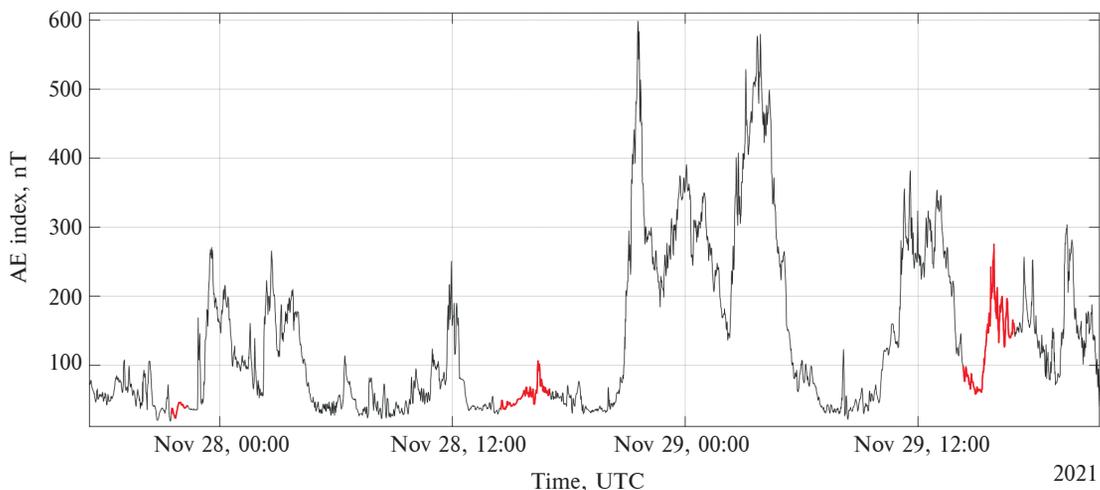


Рис. 2. AE-индекс геомагнитной активности в период 27–30.XI.2021. Красным цветом показаны временные интервалы регистрации последовательности УФ-микровсплесков.

На рис. 3 приведена подробная информация о сериях всплесков 27 и 29 ноября. В левой части рисунков показаны временные профили интенсивности свечения за длительный интервал

измерений. Справа – части временных интервалов с исследуемыми последовательностями микровсплесков. Эти два случая рассмотрены более подробно, так как они произошли при различных

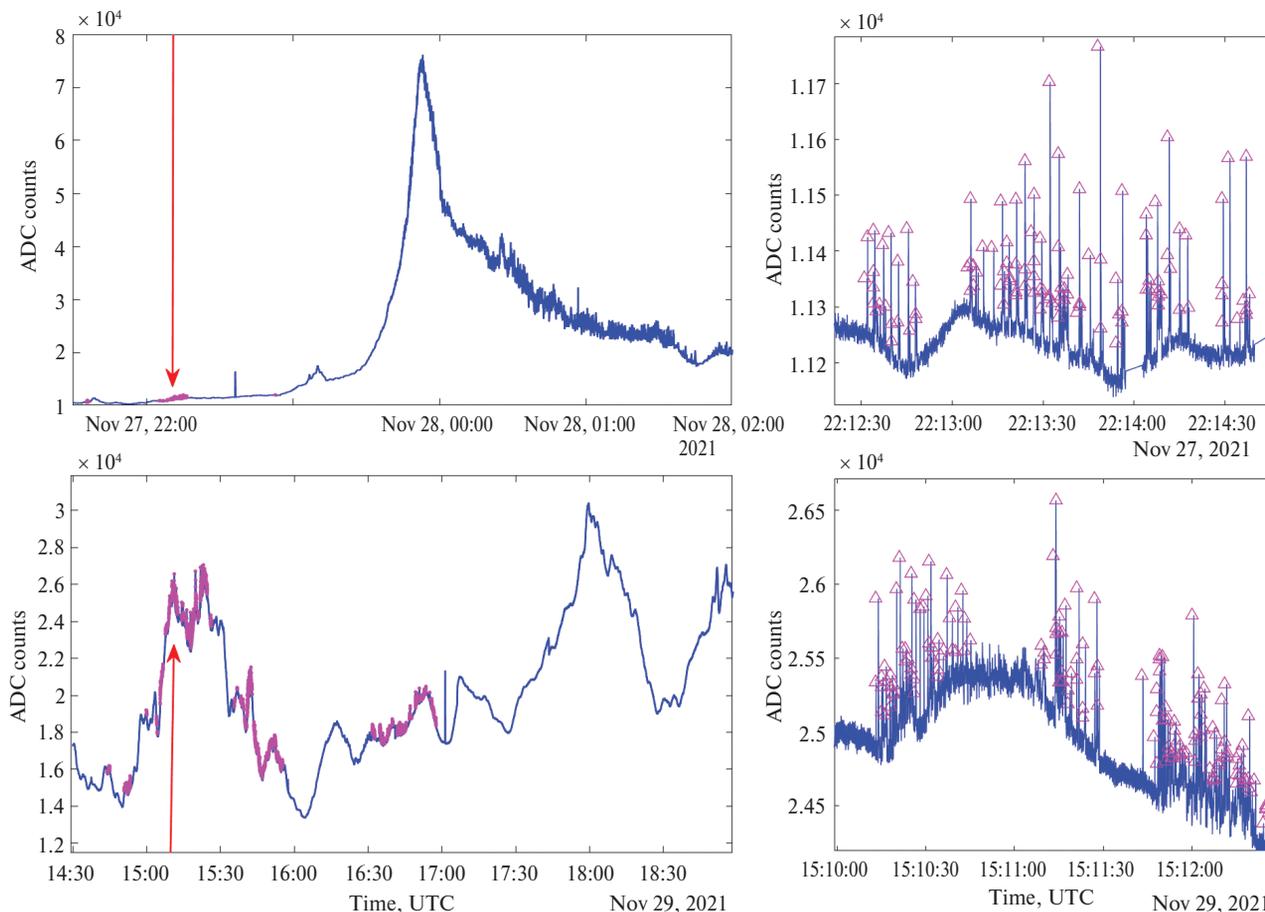


Рис. 3. Сверху: результаты наблюдения микровсплесков 27.XI.2021. Слева показана кривая свечения от момента заката до 02:00 UTC. Справа – временной интервал, содержащий микровсплески. Розовыми маркерами отмечены отобранные микровсплески. Положение интервала на кривой свечения обозначено красной стрелкой. Снизу: тоже самое для 29.XI.2021 г.

уровнях геомагнитной активности. Видно, что уровень фонового свечения в приведенные два дня отличаются в 2–2.5 раза. В первом случае регистрация всплесков происходит на фоне ясного неба в отсутствие дополнительного свечения, обусловленного высыпаниями частиц. Во втором случае наблюдаются слабые полярные сияния с характерными дугообразными структурами в направлении восток – запад, обуславливающих повышение фонового излучения. Интересно, что в обоих случаях регистрация микровсплесков происходит на дневной / вечерней стороне, а после полуночи, когда наблюдаются относительно яркие сияния, включая ППС, микровсплесков нет.

Последовательности микровсплесков имеют сложную временную структуру на разных масштабах. Каждый всплеск, как правило, имеет несколько импульсов, следующих друг за другом с интервалами 100–400 мс. На рис. 1а видна эта внутренняя структура импульсов, следующих один за другим через интервалы 2–4 с. В тоже время, эти всплески появляются сериями («пачками»), длительность

которых может быть разной и варьируется от нескольких секунд до десятков минут. На правой части рис. 3 хорошо видна эта структура следования импульсов «пачками».

Отдельно для случаев с низкой геомагнитной активности (27 и 28.XI.2021) и во время суббури (29.XI.2021) были проанализированы некоторые характеристики последовательностей УФ-микровсплесков. На рис. 4 показаны распределения микровсплесков по амплитуде (слева для 27 и 28, справа для 29 ноября). Видно, что для дней в условиях низкой геомагнитной активности распределение уже и смещено в сторону малых амплитуд. Медианные значения совпадают, но доля всплесков с большой амплитудой преобладает 29.XI.2021, когда микровсплески наблюдались на фоне полярных сияний. Если интерпретировать УФ-микровсплески как проявления высыпания электронов высокой энергии, то в этом случае можно говорить об увеличении энерговыделения в атмосфере, которое связано с ростом числа частиц в пучке или их энергией. Максимальную энергию частиц можно

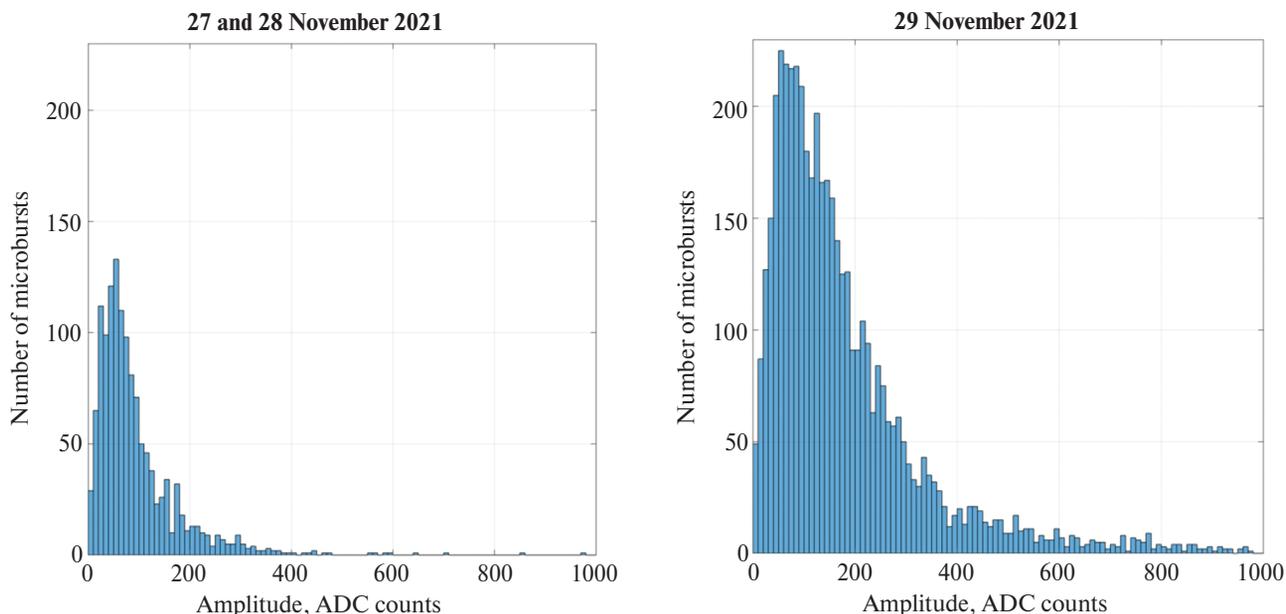


Рис. 4. Распределения УФ-микровсплесков по амплитуде. Слева — для дней с низкой геомагнитной активностью (27 и 28.XI.2021). Справа — для дня с высокой геомагнитной активностью (29.XI.2021).

определить по глубине свечения методом триангуляции или спектральным анализом свечения.

Важно отметить и существенное увеличение числа (или частоты) регистрируемых УФ-микровсплесков в период повышенной геомагнитной активности. Так, если для 27 ноября число зарегистрированных событий составило 340, т.е. средняя частота ~ 8.3 соб./мин, то для 29 ноября было отмечено ~ 4800 событий, а частота регистрации — 34 соб./мин, т.е. примерно в четыре раза больше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен предварительный поиск и анализ коротких микровсплесков УФ-излучения по данным фотометра, работающего с сентября 2021 г. в обсерватории «Верхнетуломская», Мурманская область. Временное разрешение и высокая чувствительность детектора позволяет отбирать события с характерной длительностью менее 1 с. При анализе первого сезона работы аппаратуры (2021 / 2022) обнаружены длительные последовательности всплесков 27–29.XI.2021, которые приведены и обсуждаются в данной работе.

Микровсплески возникают как в спокойных геомагнитных условиях, так и во время суббурь, при этом, амплитуда сигнала и частота следования во время суббурь в несколько раз больше, чем в спокойное время. Последовательности микровсплесков имеют сложную «вложенную» временную структуру. Длительные серии (более часа) разбиты на отдельные «пачки» от нескольких секунд до десятков минут с секундными временными интервалами между импульсами, а сами

всплески являются многопиковыми с интервалами 100–400 мс.

Возможной причиной происхождения УФ-микровсплесков являются так называемые микровсплески релятивистских электронов, которые были зарегистрированы ранее как в баллонных, так и в спутниковых экспериментах. Максимум в распределении МРЭ, регистрируемых в эксперименте *SAMPEx*, по *L*-оболочкам приходится на $L \approx 6$. Это значение соответствует расположению геофизического полигона «Верхнетуломский». Существующие модельные расчеты показывают, что прохождение пучков релятивистских электронов через атмосферу может быть зарегистрировано оптическими приборами на основе фотоэлектронных умножителей в диапазоне длин волн, используемых в фотометрах PAIPS [11].

Для подтверждения и проверки данной гипотезы планируется провести анализ данных фотометра и спутниковых измерений потоков заряженных частиц, а также с помощью стереометрических наблюдений, после установки второго фотометра системы PAIPS в обсерваторию «Ловозеро». Это позволит наблюдать не только временную структуру событий, но и высотное распределение свечения во время микровсплесков, и тем самым косвенно определить энергии высыпающихся электронов.

Исследование высыпания релятивистских электронов оптическими методами может служить одним из средств для оценки влияния таких событий на состояние средней и верхней атмосферы Земли. В частности, в условиях полярной ночи, именно высыпания электронов низких энергий порядка 1–10 кэВ являются основным источником

ионизации, однако высокоэнергичная часть спектра, дающая незначительный вклад в общую ионизацию на ионосферных высотах может служить возможной причиной быстрых внезапных изменений концентрации озона [22, 23, 24]. Поэтому, исследования частоты, интенсивности и продолжительности высыпаний энергичных электронов в авроральной и субавроральной зоне могут иметь важное практическое и теоретическое значение.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22–62–00010, <https://rscf.ru/project/22-62-00010/>).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Мировому центру геомагнитных данных (WDC), Киото (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/cresample.html>) за предоставление информации по АЕ-индексу геомагнитной активности.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ripoll J.F., Claudepierre S.G., Ukhorskiy A.Y. et al. Particle Dynamics in the Earth's Radiation Belts: Review of Current Research and Open Questions // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2020. V. 125. Iss. 5. Art. ID. e2019JA026735. <https://doi.org/10.1029/2019JA026735>
2. Anderson K.A., Milton D.W. Balloon observations of X-rays in the auroral zone: 3. High time resolution studies // *J. Geophysical Research*. 1964. V. 69. Iss. 21. P. 4457–4479.
3. Solar Anomalous Magnetospheric Particle Explorer. <https://lasp.colorado.edu/sampex/> (дата обращения: 05.08.2023)
4. Baker D.N., Mason G.M., Figueroa et al. An overview of the Solar Anomalous, and Magnetospheric Particle Explorer (SAMPEX) mission // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1993. V. 31. Iss. 3. P. 531–541. <https://doi.org/10.1109/36.225519>
5. Douma Emma, Rodger Craig, Blum Lauren et al. Occurrence characteristics of relativistic electron microbursts from SAMPEX observations: Occurrence of relativistic microbursts // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2017. V. 122. P. 8096–8107. <https://doi.org/10.1002/2017JA024067>
6. Douma E. Relativistic Electron Microbursts: Properties and Possible Plasma Wave Drivers (Thesis, Doctor of Philosophy). Otago: University of Otago, 2018. 409 pp. <http://hdl.handle.net/10523/8771>
7. Shumko M., Gallardo-Lacourt B., Halford A.J. et al. A Strong Correlation Between Relativistic Electron Microbursts and Patchy Aurora // *Geophysical Research Letters*. 2021. V. 48. P. 8811–8818. <https://doi.org/10.1029/2021GL094696>
8. Time History of Events and Macroscale Interactions During Substorms (THEMIS). https://themis.igpp.ucla.edu/instrument_asi.shtml (дата обращения: 11.08.2023).
9. Shumko M., Blum L.W., Crew A.B. Duration of individual relativistic electron microbursts: A probe into their scattering mechanism // *Geophysical Research Letters*. 2021. V. 48. Art. ID. e2021GL093879. <https://doi.org/10.1029/2021GL093879>
10. Marshall R.A., Nicolls M., Sanchez E. et al. Diagnostics of an artificial relativistic electron beam interacting with the atmosphere // *Geophys. Res. Space Physics*. 2014. V. 119. P. 8560–8577. <https://doi.org/10.1002/2014JA020427>
11. Marshall R.A., Xu Wei, Kero Antti et al. Atmospheric effects of a relativistic electron beam injected from above: Chemistry, electrodynamics, and radio scattering // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2019. V. 6. Iss. 6. <https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00006>
12. Turunen Esa, Verronen Pekka T., Seppala Annika et al. Impact of different energies of precipitating particles on NOx generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2009. V. 71. P. 1176–1189. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.07.005>
13. Oyama S., Kero A., Rodger C.J. et al. Energetic electron precipitation and auroral morphology at the substorm recovery phase // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2017. V. 122. P. 6508–6527. <https://doi.org/10.1002/2016ja023484>
14. Miyoshi Y., Saito S., Kurita S. et al. Relativistic electron microbursts as high-energy tail of pulsating aurora electrons // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2015. V. 120. P. 2754–2766. <https://doi.org/10.1029/2020GL090360>
15. Fasil Tesema, Noora Partamies, Hilde Nesse Tyssøy et al. Observations of precipitation energies during different types of pulsating aurora // *Ann. Geophys.* 2020. V. 38. P. 1191–1202. <https://doi.org/10.5194/angeo-38-1191-2020>
16. Loss through Auroral Microburst Pulsations. URL: <https://lamp-mission.sites.uiowa.edu/>. (дата обращения: 11.08.2023)
17. Taku Namekawa, Takefumi Mitani, Kazushi Asamura et al. Simultaneous Precipitation of Sub-Relativistic

- Electron Microburst and Pulsating Aurora Electrons // Authorea Preprints. 2023.
<https://doi.org/10.22541/essoar.168167378.83120518/v1>.
18. Brito T., Woodger L., Hudson M. et al. Energetic radiation belt electron precipitation showing ULF modulation // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. Iss. 22. Art.ID. L22104.
<https://doi.org/10.1029/2012GL053790>
19. Balloon Array for Radiation Belt Relativistic Electron Losses.
URL: <https://barrel.rmillan.host.dartmouth.edu/>
(дата обращения: 11.08.2023).
20. Woodger L.A., Halford A.J., Millan R.M. et al. A summary of the BARREL campaigns: Technique for studying electron precipitation // J. Geophysical Research: Space Physics. 2015. V. 120. P. 4922–4935.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020874>
21. Klimov P., Sharakin S., Belov A. et al. System of Imaging Photometers for Upper Atmospheric Phenomena Study in the Arctic Region // Atmosphere. 2022. V. 13. Iss. 10. Art. ID. 1572.
<https://doi.org/10.3390/atmos13101572>
22. Thorne R.M. Energetic radiation belt electron precipitation: a natural depletion mechanism for stratospheric ozone // Science. 1977. V. 195. Iss. 4275. P. 287–289.
<https://doi.org/10.1126/science.195.4275.28>
23. Ozaki M., Shiokawa K., Kataoka R. et al. Localized mesospheric ozone destruction corresponding to isolated proton aurora coming from Earth's radiation belt // Scientific Reports. 2022. V. 12. Art. ID. 16300.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-20548-2>.
24. Turunen E., Kero A., Verronen P.T. et al. Mesospheric ozone destruction by high-energy electron precipitation associated with pulsating aurora // Geophysical Research Atmospheres. 2016. V. 121. P. 11852–11861.
<https://doi.org/10.1002/2016JD025015>.