

УДК 550.388.2

## ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ КОЛЬЦЕВОГО ТОКА НА ШИРОТАХ ДИФFUЗНОГО СИЯНИЯ И SAR-ДУГИ

С.Г. Парников, И.Б. Иевенко

Представлены результаты исследований динамических явлений в ДС и SAR-дуге по данным фотометрических наблюдений на меридиане Якутска (CGMC: 55–60° N, 200° E). Показана связь развития пульсаций свечения в эмиссии 427.8 нм  $N_2^+$  с формированием SAR-дуги или красной полосы экваториальнее границы диффузного сияния в эмиссии 557.7 нм во время суббури. Выполнен спектральный анализ короткопериодных вариаций свечения. Проведена предварительная систематизация динамических спектров пульсирующих высыпаний энергичных частиц в области частот 0.02–1 Гц. Рассмотрены типичные ситуации развития пульсаций свечения в эмиссиях  $N_2^+$  (пульсирующих высыпаний энергичных частиц) и их связь с вариациями геомагнитных индексов SYM-H и ASY-H, характеризующих динамику кольцевого тока.

### Введение

Диффузное сияние (ДС) и среднеширотные красные дуги (SAR-дуги) наблюдаются на субавроральных широтах, соответствующих ионосферным проекциям околоземного плазменного слоя и плазмопаузы. Усиление эмиссии 630.0 нм [OI] в красных дугах обусловлено потоком сверхтепловых электронов, который возникает в результате взаимодействия внешней плазмосферы с энергичными ионами кольцевого тока во время магнитных бурь [1]. ДС вызывается диффузными высыпаниями мягких электронов из околоземной области плазменного слоя во время увеличения магнитной активности [2]. В [3–5] впервые показана закономерная связь динамики ДС и SAR-дуг с магнитосферной суббурей. В частности, получено, что в период фазы восстановления интенсивных суббурь на широтах SAR-дуги обычно наблюдаются пульсации свечения в эмиссии 427.8 нм  $N_2^+$  вследствие пульсирующих высыпаний энергичных частиц [4]. Это, вероятнее всего, свидетельствует о проникновении развивающегося кольцевого тока в область внешней плазмосферы во время суббури. В этой работе представлены первые результаты анализа пульсирующих высыпаний частиц на широтах ДС и SAR-дуги по данным наблюдений на меридиане Якутска цифровым фотометрами.

### Методика и результаты наблюдений

В работе использованы данные фотометрических наблюдений в эмиссиях 630.0, 557.7 [OI] и 427.8  $N_2^+$  нм на оптической ст. Маймага (57° N; 200° E, геом.) Диффузные сияния и SAR-дуги регистрировались сканирующим вдоль меридиана цифровым фотометром. Измерения вариаций интенсивности эмиссий 630.0 и 427.8 нм в магнитном зените станции проводились цифровым четырехканальным фотометром. Пульсации свечения в области излучения первой отрицательной системы полос  $N_2^+$  регистрировались с частотой дискретизации 20–100 Гц широкополосными фотометрами с полем зрения 20° на трех направлениях 73° N, Z и 45° S. Данные фотометрических наблюдений сопоставлялись с вариациями геомагнитных индексов SYM-H и ASY-H, которые вычисляются WDC в Киото. Индекс SYM-H с минутным разрешением отражает вариации индекса  $D_{st}$ . ASY-H характеризует степень долготной асимметрии возмущения горизонтальной компоненты геомагнитного поля на низких широтах.

Хорошая корреляция индекса ASY-H с авроральным индексом AL дает основание связывать вариации геомагнитных индексов ASYM с усилением частичного (асимметричного) кольцевого тока на ночной стороне во время суббури [6]. Ниже представлены два примера анализа фотометрических наблюдений на меридиане Якутска.

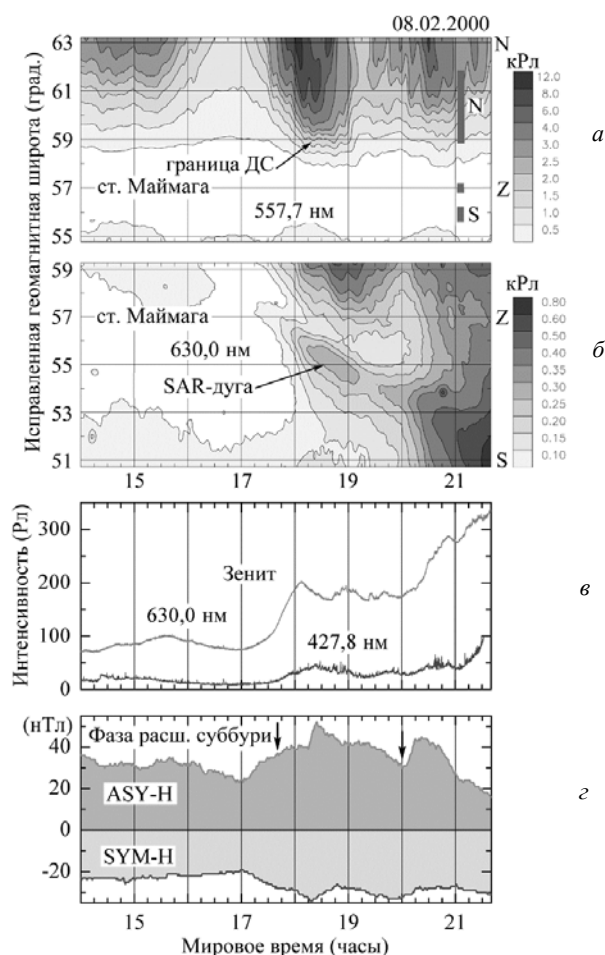


Рис. 1. Пример исследования динамики субаврорального свечения во время суббури 8 февраля 2000 г.

Сверху вниз приведены: а, б – данные сканирующего фотометра в виде изофот поверхностной яркости эмиссий 557.7 и 630.0 нм в проекции на поверхность Земли (кеограммы); в – вариации интенсивности эмиссий 630.0 и 427.8 нм по данным зенитного фотометра; г – графики индексов ASY-H и SYM-H, стрелками указаны начала фазы расширения суббури по магнитограммам низкоширотных станций.

На рис. 1 показана связь пульсирующих вариаций интенсивности эмиссии 427.8 нм  $N_2^+$  с динамикой диффузного сияния и SAR-дуги во время суббурь 08.02.2000 г. В зеленой линии атомарного кислорода (а) показана меридиональная динамика свечения в северной части неба, а в красной (б) – в южной. На фазе роста первой суббури с ~17:00 UT происходит расширение ДС в экваториальном направлении. Фаза расширения суббури начинается с активизации авроральной дуги на северном горизонте в ~17:40 UT с одновременным ростом яркости ДС. В эмиссии 630.0 нм в это время возникает SAR-дуга в окрестности границы ДС. Красная дуга отделяется от ДС и движется в экваториальном направлении со скоростью ~80 м/с через зенит станции оптических наблюдений. Начало фазы расширения третьей суббури в 20:00 UT вызвало уярчение SAR-дуги и ускорение ее движения к южному горизонту станции наблюдений.

По данным зенитного фотометра (в), значительное увеличение интенсивности эмиссии 630.0 нм в магнитном зените станции связано с формированием SAR-дуги экваториальнее границы ДС в эмиссии 557.7 нм во время фазы расширения первой суббури. С 18:00–18:20 UT наблюдаются пульсирующие всплески интенсивности эмиссии 427.8 нм  $N_2^+$  на фоне плавной вариации. В эмиссии 630.0 нм эти всплески не регистрируются. На графиках индексов ASY-H и SYM-H (з) видно, что усиление симметричного и частичного кольцевого тока начинается во время фазы роста первой суббури. Фаза расширения второй суббури вызвала увеличение индекса ASY-H (асимметрии в кольцевом токе).

На рис. 2 приведены результаты спектрального анализа пульсаций свечения в области излучения первой отрицательной системы полос  $N_2^+$  на широтах SAR-дуги и ДС 08.02.2000 г. по данным широкополосных фотометров. Развитие пульсаций свечения начинается в 17:42–17:50 UT с максимумом в спектре мощности для N-фотометра в области частот 0.2–1 Гц, а для Z- и S-фотометров в области 0.2–0.4 Гц. При этом N-фотометр регистрирует пульсации свечения в области активного ДС после начала фазы расширения суббури в 17:40 UT. В это время на Z- и S-фотометрах регистрируется развитие пульсаций в низкочастотной области на широтах формирующейся SAR-дуги (см. рис. 2). С 18:30–18:40 UT вид и спектр пульсаций свечения в зените и на юге резко изменяется. Наблюдаются квазигармонические всплески пульсаций с дискретными максимумами в спектре мощности на частотах от 0.3 до 0.8 Гц. Эти пульсации свечения развиваются на широтах SAR-дуги экваториальнее ДС.

На рис. 3 показан второй пример исследования связи пульсирующих вариаций интенсивности эмиссии 427.8 нм  $N_2^+$  с динамикой диффузного сияния и SAR-дуги во время суббурь 07.02.2000 г. Расширение ДС к югу до полярной границы SAR-дуги с последующей стабилизацией экваториальной границы происходит на фазе расширения первой суббури с 12:50 UT. В 17:30 UT на фазе расширения второй суббури вновь происходит уярчение ДС с расширением экваториальной границы до зенита стан-

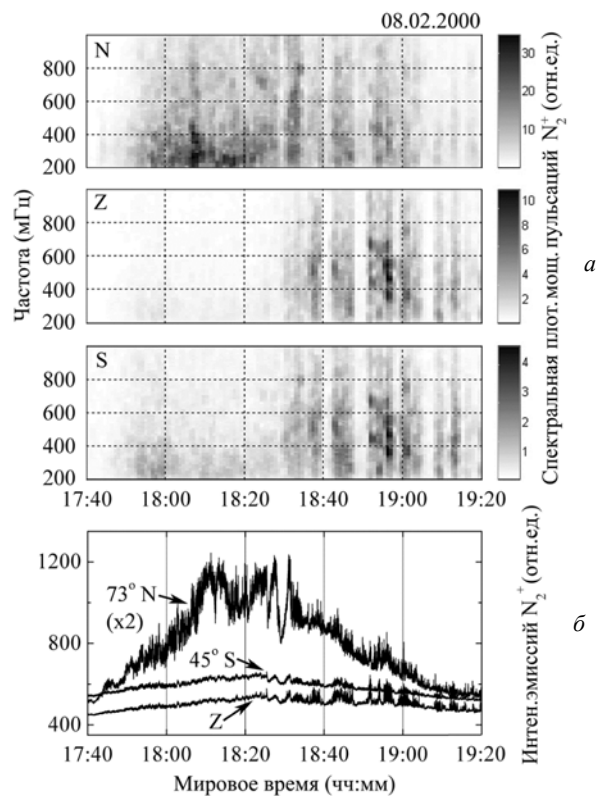


Рис. 2. Спектры пульсирующих вариаций интенсивности свечения молекулярных полос  $N_2^+$  (394.1 и 427.8 нм) для трех направлений в широтном интервале ~4° 8 февраля 2000 г. Сверху вниз приведены спектры мощности пульсаций свечения в области частот 0.2–1 (а) и графики интенсивности эмиссий  $N_2^+$  для трех направлений регистрации 73° N, Z и 45° S (б). Положение полей зрения фотометров показано на кеограмме в эмиссии 557.7 нм на рис. 1.

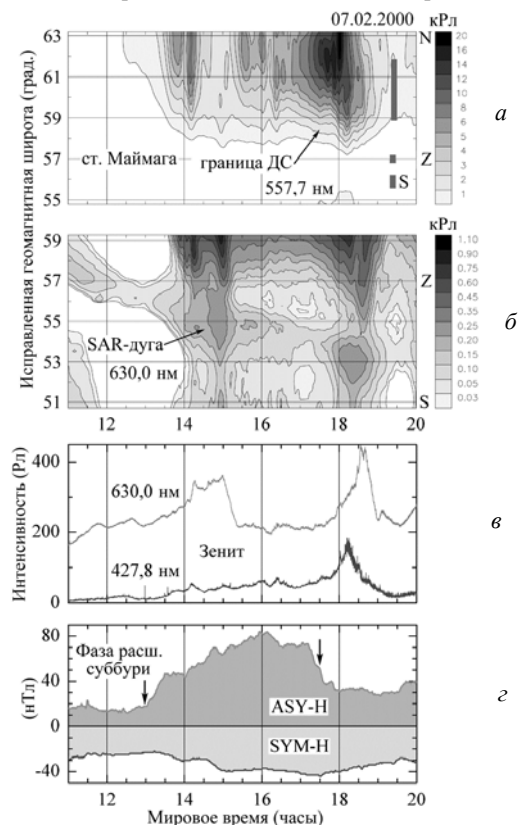


Рис. 3. Пример исследования динамики субаврорального свечения во время суббурь 7 февраля 2000 г. Обозначения те же, что и на рис. 1.

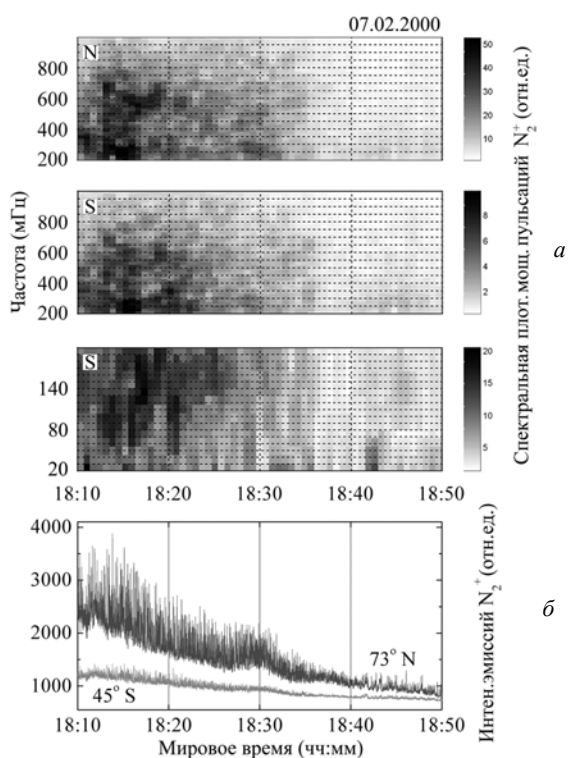


Рис. 4. Спектры пульсирующих вариаций интенсивности свечения молекулярных полос  $N_2^+$  (394.1 и 427.8 нм) для двух направлений в широтном интервале  $\sim 4^\circ$  7 февраля 2000 г. Обозначения те же, что и на рис. 2.

ции наблюдений. В эмиссии 630.0 нм в это время полоса красного свечения (red band) расширятся до полярной границы SAR-дуги. Ранее существовавшая SAR-дуга продолжает экваториальное движение, уярчаясь во время фазы расширения суббури в 12:50 и 17:30 UT.

По данным зенитного фотометра, с 18:00 UT во время затухания ДС и уярчения SAR-дуги наблюдаются пульсирующие всплески интенсивности эмиссии 427.8 нм  $N_2^+$  на широтах red band. В эмиссии 630.0 нм эти всплески не регистрируются. Увеличение индекса ASY-H началось во время фазы расширения первой суббури (экваториального расширения ДС).

Результаты спектрального анализа пульсаций свечения в области излучения первой отрицательной системы полос  $N_2^+$  на широтах SAR-дуги и ДС 07.02.2000 г. по данным широкополосных фотометров показаны на рис. 4. На графиках и спектрах мощности видно, что с 18:10 UT регистрируются синхронные пульсации с шумовым спектром на юге и на севере в частотной области 0.2–1 Гц. При этом амплитуда пульсаций на севере значительно превышает амплитуду пульсаций, регистрируемых на юге. С 18:12 UT в низкочастотной области пульсаций 0.02–0.2 Гц, регистрируемых S-фотометром, наблюдается смещение спектра в виде полосы вверх по частоте. Амплитуда пульсаций постепенно падает по мере уменьшения интенсивности SAR-дуги (red band) и ДС. По результатам корреляционного анализа выявлена задержка развития пульсаций свечения экваториальнее зенита станции наблюдения относительно

пульсаций в области ДС, где по визуальным наблюдениям в это время были пламенные сияния на N1.

### Обсуждение результатов наблюдений

В работе рассматриваются вариации интенсивности эмиссии  $N_2^+$  на широтах SAR-дуги как следствие пульсирующих высыпаний энергичных частиц кольцевого тока из области внешней плазмосферы во время суббури. В [3] пульсации условно разделены следующим образом: 1) синхронные пульсации в области ДС и SAR-дуги и 2) развитие пульсаций только экваториальнее ДС на широтах SAR-дуги. Здесь мы показали развитие обеих ситуаций, первый пример 08.02.2000 г. является типичным примером реализации второй разновидности, а 07.02.2000 г. – первой.

По первому примеру можно отметить следующие особенности (см. рис. 1 и 2): уярчение и расширение ДС и возникновение и движение SAR-дуги происходит во время фазы роста и расширения суббури. Так же после фазы расширения суббури развиваются пульсации свечения в эмиссии 427.8 нм. В эмиссии 630.0 нм эти пульсации не наблюдаются, что говорит о высокоэнергичном спектре высыпавшихся частиц ( $\sim 10$  кэВ). Пульсации развиваются во время усиления асимметрии в кольцевом токе (индекс ASY-H). Спектральный анализ выявил, что в моменты максимального усиления пульсации принимают квазигармонический характер в виде набора разделенных по частоте гармоник, лежащих в узком частотном диапазоне. Это может свидетельствовать о связи генерации пульсаций с баунс-периодами высыпавшихся частиц (2–4 с).

Особенности второго примера (см. рис. 3 и 4): уярчение и расширение ДС, возникновение и движение SAR-дуги и образование и расширение полосы красного свечения (SAR-дуги без выделенного максимума согласно терминологии и объяснению в [3, 4]) происходит также во время фазы роста и расширения суббури. В этом случае пульсации в эмиссии 427.8 нм развиваются на фоне уменьшения индекса ASY-H в период фазы расширения второй суббури. В эмиссии 630.0 нм эти пульсации не наблюдаются. Спектр этих пульсаций шумовой, амплитуда на севере значительно превышает амплитуду на юге. Корреляционный анализ выявил задержку развития пульсаций на юге и в зените станции наблюдений относительно пульсаций в ДС (результаты корреляционного анализа в работе не представлены). В низкочастотной области (0.02–0.2 Гц) наблюдается смещение спектра в виде полосы в область более высоких частот. По визуальным наблюдениям на N1 наблюдались пламенные сияния.

### Выводы

1. Показана связь развития пульсаций интенсивности эмиссии 391.4 и 427.8 нм  $N_2^+$  с формированием (уярчением) SAR-дуги или красной полосы экваториальнее границы ДС во время суббури.

2. Проведена предварительная классификация динамических спектров пульсирующих высыпаний энергичных частиц в области частот 0.02–1 Гц.

3. Наблюдение пульсаций интенсивности эмиссий 427.8 и 391.4 нм  $N_2^+$  на широтах SAR-дуги или красной полосы свидетельствует о возникновении пульсирующих высыпаний энергичных частиц кольцевого тока из области внешней плазмосферы.

Геомагнитные данные получены в WDC C2 (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cole K.D. Stable auroral red arcs, sinks for energy of  $D_{st}$  Main phase // J. Geophys. Res. 1965. V. 70, N 7. P. 1689–1706.

2. Фельдштейн Я.И., Гальперин Ю.И. Структура авроральных вторжений в ночном секторе магнитосферы // Космические исследования. 1996. Т. 34. С. 227–247.

3. Иевенко И.Б. Динамика диффузного аврорального свечения и SAR-дуги в период суббури // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т. 33, N 5. С. 42–57.

4. Иевенко И.Б. Пульсирующие высыпания частиц в области SAR-дуги вследствие суббури // Там же. 1995. Т. 35, N 3. С. 37–46.

5. Иевенко И.Б. Воздействие магнитосферной активности на плазмосферу по наблюдениям диффузного сияния и SAR- дуги // Там же. 1999. Т. 39, № 6. С. 26–32.

6. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 299 с.

*Институт космических исследований и аэронавтики имени Ю.Г. Шафера, Якутск [parnikov\\_s\\_g@ikfia.ysn.ru](mailto:parnikov_s_g@ikfia.ysn.ru)*