

# ВЫСОКОШИРОТНЫЕ СЦИНТИЛЛЯЦИИ В ПЕРИОД СУББУРИ.

О.И. Ягодкина<sup>1</sup>, В.Б. Белаховский<sup>1</sup>, Я. Джин<sup>2</sup>, В. Милош<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

<sup>2</sup> Университет Осло, Осло, Норвегия

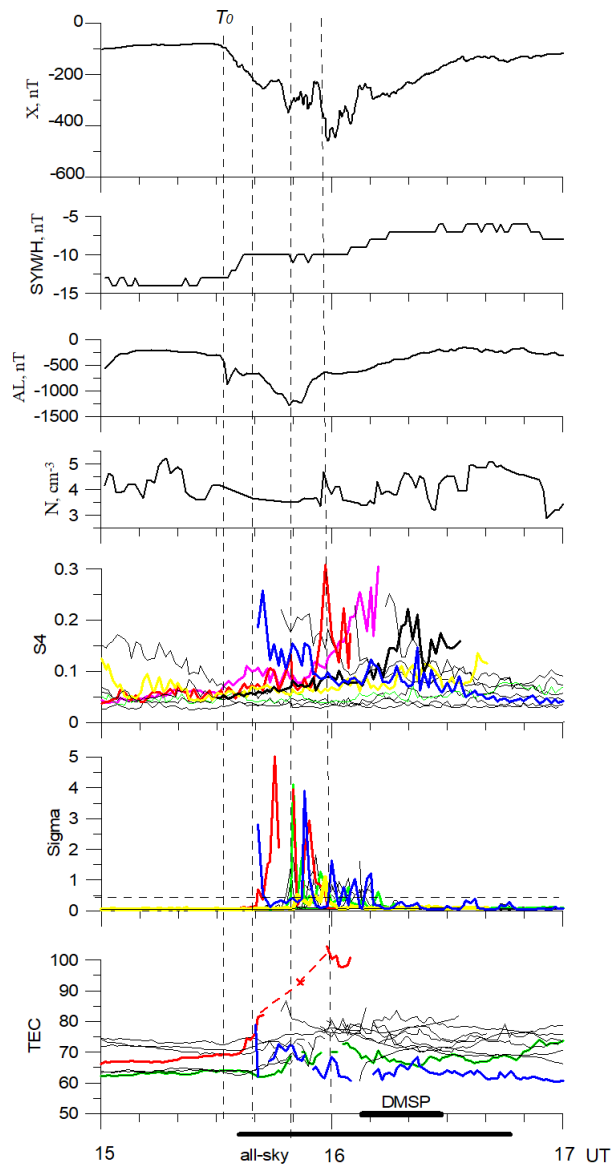
E-mail: [yagodkina@pgia.ru](mailto:yagodkina@pgia.ru)

На примере изолированной суббури 11 декабря 2015 года исследовано поведение сцинтилляций на высокоширотной обсерватории Нью-Алесунд (NYA, географические координаты: 78.92° N, 11.95° E) во время прохождения GPS сигналов через ионосферные неоднородности в виде расположенной на приполюсной кромке аврорального овала яркой дуги полярного сияния и регистрируемого в полярной шапке пятна светимости. Из 12-ти работающих в это период GPS спутников выделены спутники, сигналы которых показывают рост сцинтилляций. Рассмотрено влияние неоднородностей на амплитудные и фазовые индексы сцинтилляций, ( $S_4$ ,  $\delta\phi$ ), а также на полное электронное содержание (TEC). Показана зависимость характеристик сцинтилляций от геометрии прохождения луча GPS передатчиков через неоднородности, от геомагнитной активности и от плотности солнечного ветра. По данным оптических наблюдений сделан вывод, что регистрируемые на фазе развития и начале фазы восстановления суббури сцинтилляции вызваны потоками высыпающихся электронов в E-область ионосферы. Во время регистрации сцинтилляций на фазе восстановления суббури данные низкоорбитальных спутников DMSP F16, F18 и F19 позволили оценить характеристики высыпающихся электронов, а также размеры областей высыпаний и яркость в эмиссии 557.7 нм авроральной дуги и пятна свечения.

1

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 25-17-20038, <https://rscf.ru/project/25-17-20038> и грантом Министерства образования и науки Мурманской области.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И РЕГИСТРИРУЕМЫХ НА ОБС. НЬЮ-АЛЕСУНД СЦИНТИЛЛЯЦИЙ



2

Рис. 1

На рисунке сверху вниз в интервале 15-17 UT показаны: X-компонента магнитного поля на obs. Нью-Алесунд, SYM/H и AL –индексы, плотность плазмы солнечного ветра  $N_e$ , амплитудный и фазовый индексы ( $S_4$ ,  $\delta\phi$ ) сцинтилляций, а также распределение полного электронного содержания (TEC).

Внизу рисунка на временной шкале отмечены интервалы наблюдений камерой всего неба (15:30 -16:30 UT), время пролета спутников DMSF F17 - F19 (16:09 -16:22 UT). Вертикальными штриховыми линиями на рисунке отмечены времена начала суббури ( $T_0$ ), регистрации сцинтилляций и максимумов магнитной активности по данным OMNI Web и на obs. Нью-Алесунд.

СХЕМА НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ НА ОБС. НЬЮ-АЛЕСУНД СУББУРИ В ИНТЕРВАЛЕ 15:30-16:30 UT

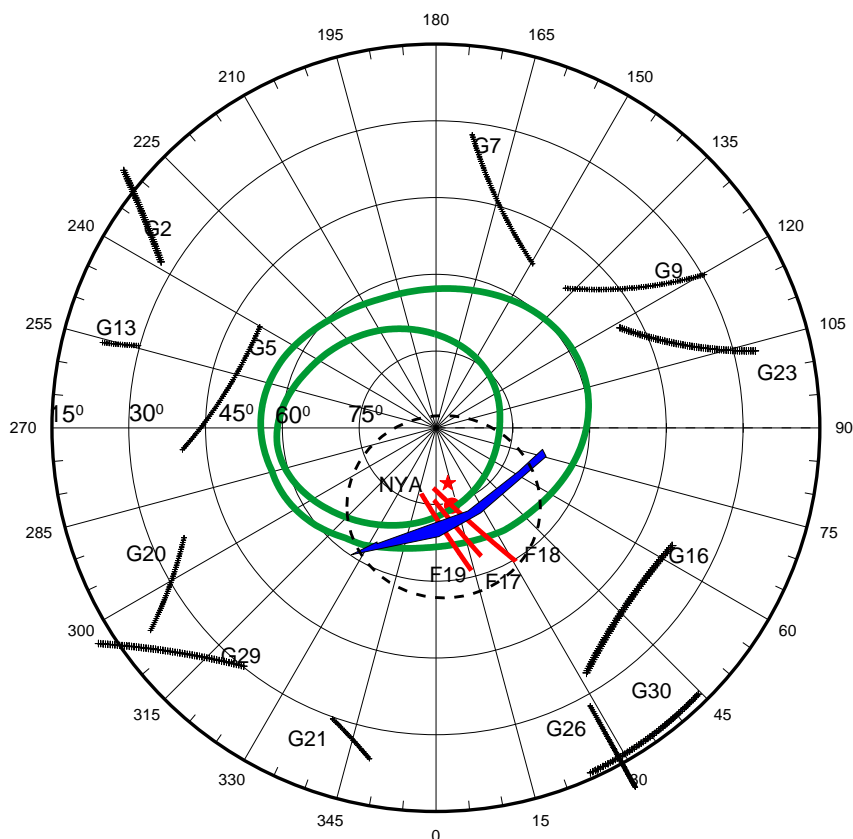


Рис. 2.

Схема представлена в географической системе координат во время регистрации сцинтилляций в обс. Нью-Алесунд. Черными линиями с расположенной рядом аббревиатурой показаны траектории GPS спутников в интервале 15:30-16:30 UT. Авроральный овал построен для условий  $AL=-1276$  нТл,  $Dst=-10$  нТл (максимум суббури в 15:48-16:00 UT), его границы обозначены зеленым цветом. Красной звездочкой и кружком показаны положения обс. Нью-Алесунд и пятна свечения, соответственно. Дуга сияний показана синим. Траектории спутников DMSP F17-F19 обозначены тремя красными линиями, а поле зрения камеры всего неба – окружностью со штриховой границей. Авроральная дуга располагается на приполюсной границе овала, а пятно светимости – в полярной шапке.

НАБЛЮДЕНИЯ КАМЕР ВСЕГО НЕБА АВРОРАЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ НА ОБС.  
ЛОНГЙИР (LYR, 78.2° N, 15.82° E).

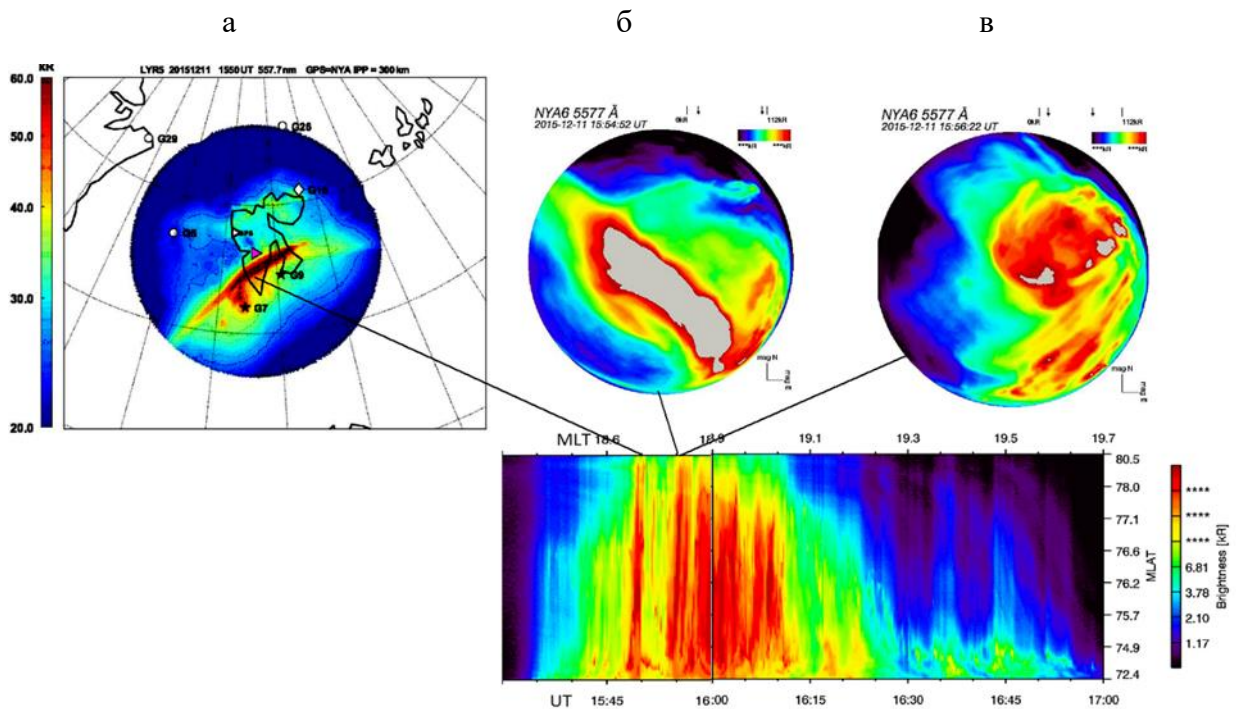


Рис. 3

Как видно из Рис. 2, неоднородность в виде авроральной дуги располагалась на приполюсной границе овала, а пятно светимости – в полярной шапке.

По данным камеры всего неба, расположенной на обс. Лонгйир, исследовалось поведение интегральной интенсивности свечения эмиссии (OI) 557.7 нм. во время суббури. Изображения с камеры относятся к 15:50 UT (а), 15:54:22 UT (б) и 15:56:22 UT (в). Авроральная дуга в максимуме суббури (15:48 UT) интенсивностью  $>60$  кР и шириной порядка 200 км была вытянута в направлении юго-запад – северо-восток. Дуга располагалась на фоне диффузного свечения интенсивностью  $\sim 30$  кР и локализована экваториальнее обсерватории Нью Алесунд, положение которой на рис. 3а обозначено белым треугольником. Как видно из рис. 3б, интенсивность свечения в 15:54:22 UT достигала  $>100$  кР. Дуга такой интенсивности может быть вызвана высыпанием потоков энергичных электронов и располагаться в области E ионосферы на высоте  $\sim 100$  км. Изменение интенсивности свечения вдоль дуги свидетельствует о неравномерной плотности ионизации, что, несомненно, сказывается на искажении принимаемых GPS сигналов.

Рисунок 3в демонстрирует пятно аврорального свечения в районе полярной шапки и расположенную экваториальнее него авроральную дугу. Интенсивность свечения пятна в максимуме суббури превышает 100 кР.

Показанная на нижнем рисунке кеограмма получена из записей аврорального свечения. Внизу кеограммы указано время UT, сверху - MLT. Исправленная геомагнитная широта (MLAT) отложена вдоль вертикали справа. Шкала интенсивности в килорелеях демонстрирует ограниченность динамического диапазона камеры. Динамика свечения в эмиссии 630.0 нм аналогична, но максимальное значение интенсивности оценивается величиной 3 кР.

## Наблюдения спутниками DMSP F17-F19

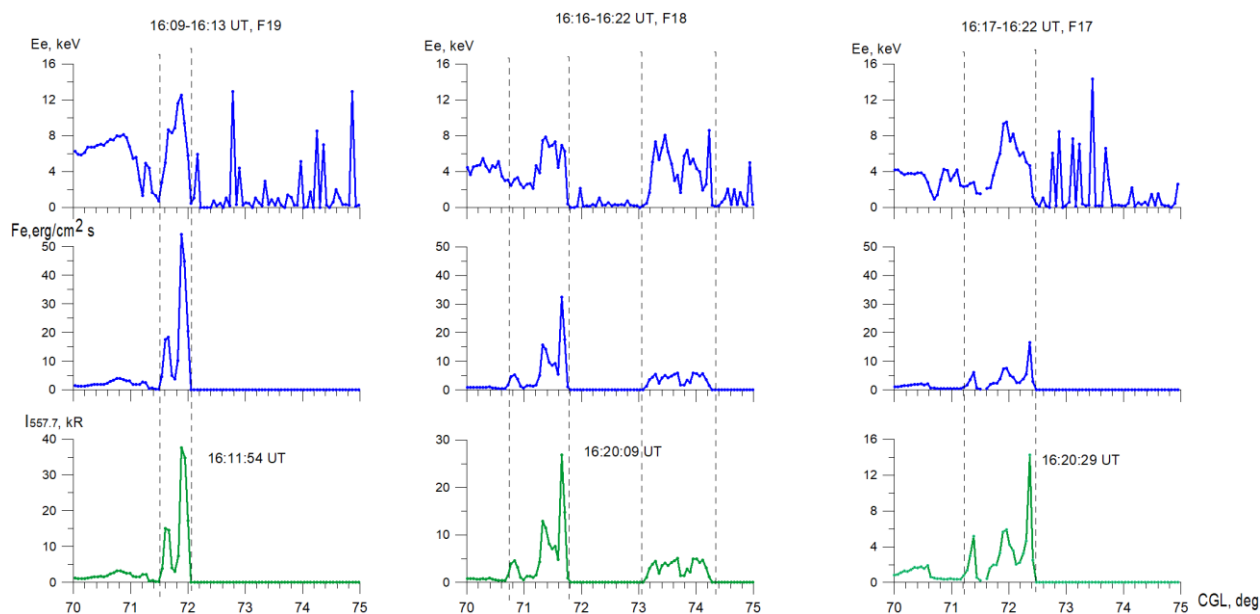


Рис. 4

На рис. 2 показаны траектории спутников DMSP F16 - F19, пересекающие область авроральных высыпаний в интервале времени 16:09:30-16:22:31 UT. Пролет каждого спутника проходил через авроральный овал в направлении от низких широт к высоким. Все пролеты приходятся на время фазы восстановления суббури, когда величина AL -индекса менялась от -488 до -304 нТл. На рисунке представлены средние энергии  $E_e$ , потоки энергии высыпающихся электронов  $Fe$  и интенсивности аврорального свечения в эмиссии 557.7 нм. Как видно на второй панели рисунка, потоки энергии высыпающихся электронов локализованы в интервале широт  $70.8-74.5^\circ$ . Интервал широт  $70.8-72.5^\circ$  CGL приходится на приполюсную область овала, в районе которого расположена авроральная дуга, широты  $73.1-74.5^\circ$  CGL – область полярной шапки – район регистрации пятна светимости. Как следует из рисунка, максимальный поток энергии, как и интенсивность свечения в эмиссии 557.7 нм, приходится на приполюсную часть высыпаний. Ширина области высыпаний меняется от ~50 до 130 км при изменении яркости дуги от 35 до 15 кР.

Пятно свечения в полярной шапке, регистрируемое спутником F18 на широтах  $73.1-74.5^\circ$  CGL в 16:20:34-16:20:56 UT, имело размер порядка 110 км и было вызвано высыпаниями электронов с энергией ~6-8 кэВ.

Максимальная яркость пятна свечения в эмиссии 557.7 нм составляет ~5 кР.

**ПОВЕДЕНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ В ИНТЕРВАЛЕ ВРЕМЕНИ  
15:30 -16:30 UT.**

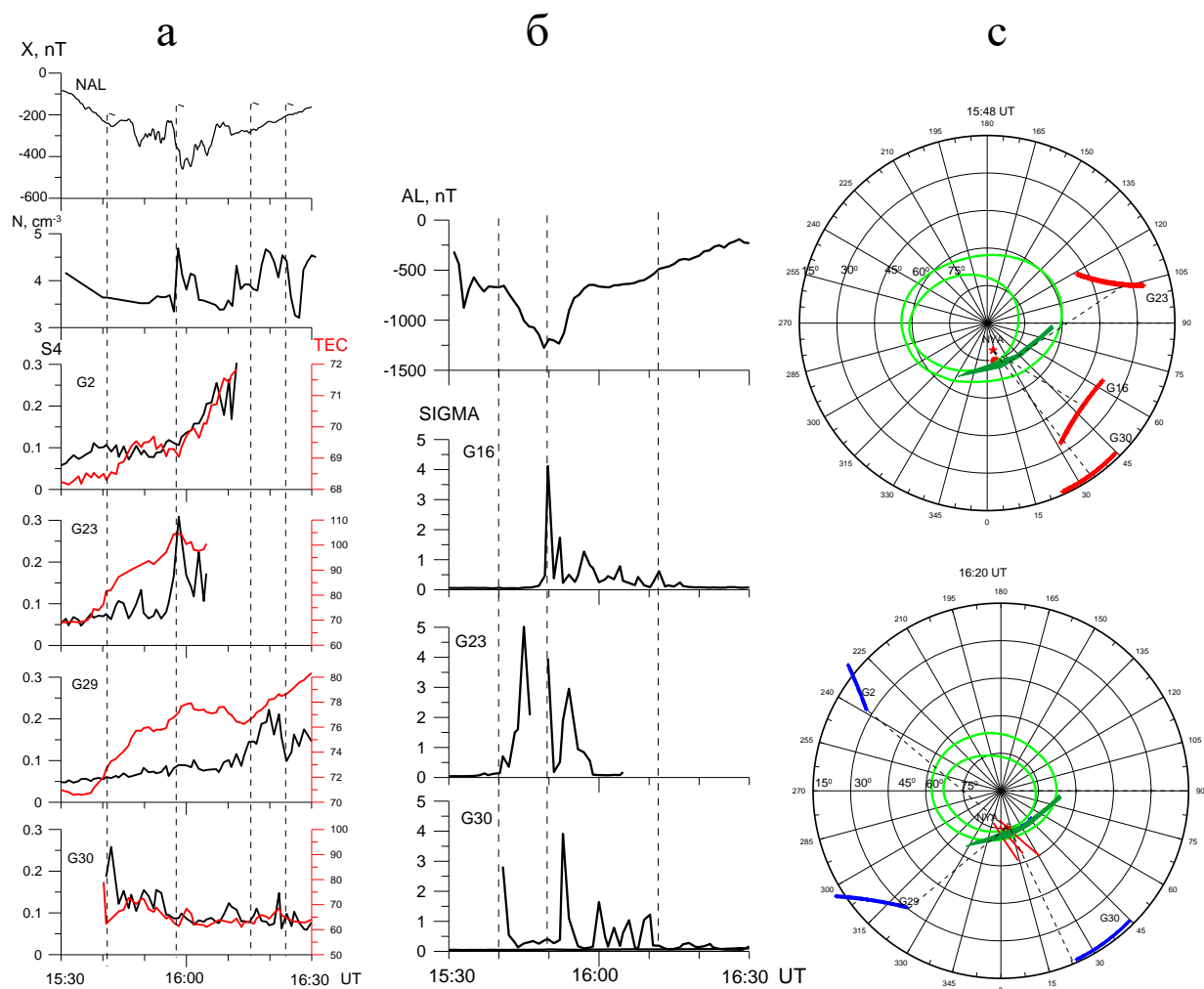


Рис. 5.

На Рис. 5 показано поведение сцинтилляций (а,б) и положения GPS – спутников (в) в интервале времени 15:30 -16:30 UT. Нанесенные на карту авроральные овалы относятся ко времени максимума суббури в 15:48 UT и к фазе восстановления суббури в 16:20 UT.

Находящийся на obs. Нью-Алесунд приемник получал пакет сигналов от 12-ти GPS спутников (G2, G5, G7, G9, G13, G16, G20, G2, G23, G26, G29, G30). Были выделены случаи, когда амплитудный индекс сцинтилляций  $S4 > 0.1$  (Рис. 5а), а фазовый  $\delta\phi > 0.4$  рад (Рис. 5б). Порог 0.4 рад. соответствует приблизительно 10%-ной вероятности потери связи между спутником и приемником, что приводит к увеличению погрешности определения местоположения объекта.

*На рисунках: 5а* – сверху вниз: X-компонента магнитной активности на obs. Нью-Алесунд, плотность солнечного ветра, амплитудный индекс

сцинтилляций S4 (черные кривые) и полное электронное содержание TEC (красные кривые), регистрируемые в сигналах GPS – спутников G2, G23, G29 и G30.

5б – AL-индекс авроральной активности, фазовый индекс сцинтилляций  $\delta\sigma$  (Sigma) в сигналах GPS – спутников G16, G23 и G30.

5в - траектории GPS спутников в географической системе координат во время регистрации сцинтилляций: в максимуме суббури в 15:48 UT и на фазе восстановления суббури в 16:20 UT во время пролета спутников DMSP F17-F19, траектории которых показаны тремя красными линиями. Красной звездочкой обозначено положение obs. Нью-Алесунд. Пятно свечения расположено между obs. Нью-Алесунд и приполюсным краем дуги, которая показаны зеленым. Границы аврорального овала также обозначены зеленым цветом, а траектории лучей спутников GPS показаны штрихпунктирными линиями.

Рассмотрим отдельно поведение индексов сцинтилляции и полного электронного содержания в процессе развития суббури.

*Амплитудный индекс S4 и полное электронное содержание TEC.*

*Рис. 5а.* Как видно из рисунка, только траектория лучей от 3-х спутников G23, G29 и G30 пересекают авроральную дугу, а через пятно светимости проходит траектория лучей от G29 и G30.

*Спутник G23.* Траектория сигнала спутника с 15:30 по 16:30 UT показана на верхней панели Рис. 5в и проходит вдоль авроральной дуги. Как видно из Рис. 5а, рост TEC наблюдается на фазе развития суббури и достигает максимального значения 110 TEC в ее максимуме, когда I(557.7) также максимальна. То есть рост геомагнитной активности, увеличение потоков энергии высыпавшихся частиц в процессе развития суббури вызывают рост полного электронного содержания. В максимуме суббури регистрируется резкий рост амплитудного индекса сцинтилляций S4, когда такой же рост фиксируется в плотности солнечного ветра.

*Спутник G29.* Траектория сигнала спутника проходит под углом к неоднородности. Как и в предыдущем случае, спутник регистрирует рост полного электронного содержания в начале развития суббури, которое в районе максимума суббури достигает значения 78 TEC, но значительный рост TEC фиксируется и на фазе восстановления суббури. В это время спутник DMSP F18 пересекает пятно светимости (16:15-16:23 UT на широтах 73.1-74.2 CGL). Согласно его данным (Рис. 4б), интенсивность свечения пятна ~5 кР. Индекс амплитудных сцинтилляций в этот промежуток времени возрастает до 0.2 и во временном интервале совпадает с увеличением плотности солнечного ветра (вторая панель Рис. 5а).

*Спутник G30.* Траектория сигнала спутника показана на нижней панели Рис. 5в и проходит под углом к краю авроральной дуги. Ни *S4*, ни *TEC* не демонстрируют значительных изменений.

*Спутник G2.* Траектория сигнала спутника, показанная на нижней панели Рис. 5в, не пересекает указанные выше неоднородности. Однако начало суббури сопровождается ростом *TEC* и последующим на фазе восстановления суббури синхронным ростом *TEC* и *S4*, что свидетельствует о наличии пересечения сигналом спутника какой-то неоднородности. В качестве неоднородности может служить авроральный овал, пересечение которого сигналом от GPS спутника может способствовать росту мерцаний и ухудшению параметров принимаемого сигнала.

#### *Фазовый индекс $\delta\phi$*

Рис. 5б демонстрирует AL-индекс авроральной активности, фазовый индекс сцинтилляций  $\delta\phi$  (*Sigma*) в сигналах GPS – спутников G16, G23 и G30. Вертикальными штрихпунктирными линиями отмечены времена начала суббури, ее максимум и время пролета спутников DMSP F17-F19. Как следует из рисунка, высокий уровень  $\delta\phi$  вплоть до 5 рад фиксировался в сигналах трех GPS спутников. Максимальное значение  $\delta\phi=5$  рад регистрируется в сигнале GPS G23 на фазе развития суббури, рост которого начался в  $T_0$ . Как отмечалось выше, траектория луча этого спутника проходила вдоль авроральной дуги с неравномерной плотностью ионизации. Траектории спутников G16 и G30 ориентированы перпендикулярно к авроральной дуге, однако и тот, и другой регистрируют ухудшение качества сигнала в течение фазы развития и начальной фазы восстановления. Величина  $\delta\phi$  достаточно высока и составляет ~3-4 рад. Следует отметить, что траектория луча спутника G30 в 15:58-16:13 UT проходила через расположенное в полярной шапке пятно свечения, что отразилось и в росте  $\delta\phi$  до ~1 рад.

8

#### *ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАБОТЫ:*

1. Показана зависимость характеристик сцинтилляций от геомагнитной активности и плотности солнечного ветра.
2. Амплитудный индекс *S4* для ряда спутниковых сигналов растет сразу после начала суббури ( $T_0$ ) и претерпевает изменения в процессе ее развития. Максимальное значение *S4* зафиксировано при приеме сигнала от GPS спутника, чья траектория луча проходит вдоль авроральной дуги. В этом случае полное электронное содержание *TEC* демонстрирует рост, достигая максимального значения в максимуме суббури и максимальном значении интенсивности свечения в эмиссии 557.7 нм. Резкий рост *S4* совпадает с подобным ростом плотности плазмы солнечного ветра.

3. На фазе восстановления суббури увеличение амплитуды сцинтилляций S4 во времени совпадает с ростом плотности плазмы солнечного ветра.
4. Величина отклонения фазового индекса  $\delta\phi$  зависит как от величины геомагнитной активности, так от геометрии прохождения радиосигнала через неоднородность. Максимальное значение  $\delta\phi$  фиксируется при прохождении луча сигнала вдоль неоднородности и уменьшается при перпендикулярном пересечении лучом протяженной неоднородности.
5. Регистрируемые на фазе развития и начале фазы восстановления суббури сцинтилляции были вызваны потоками высыпающихся электронов в E- и F областях ионосферы (авроральная дуга, пятно свечения).
6. Использование данных низкоорбитальных спутников DMSP F16 - F19, регистрирующих на фазе восстановления суббури характеристики высыпающихся электронов, позволило оценить параметры высыпающихся частиц, а также размеры и интенсивности свечения неоднородностей - авроральной дуги и пятна свечения, влияющих на характеристики сцинтилляций. Так, в авроральной дуге шириной порядка 200 км интенсивность свечения менялась в пределах 15-100 кР в эмиссии 557.7 нм при энергии высыпающихся электронов 8-12 кэВ. Интенсивность свечения пятна размером ~120 км, расположенном в полярной шапке, составляло 5 кР при энергии электронов ~6 кэВ.