

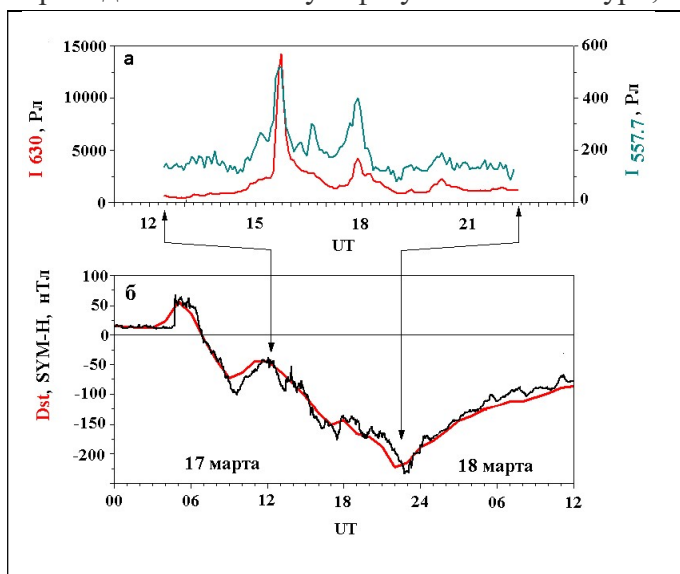
# Динамика ионосферы и атмосферных свечений 17 марта 2015 г. в средних широтах

Золотухина Н.А., Полах Н.М., Михалев А.В., Белецкий А.Б., Подлесный С.В.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

## 1. Введение.

В ночные часы 17 марта 2015 г. на Геофизической обсерватории Торы ( $\varphi = 52^\circ \text{ N}$ ,  $\lambda = 103^\circ \text{ E}$ , исправленная геомагнитная широта  $\varphi' = 47.9^\circ$ ) наблюдалось усиление интенсивностей эмиссий 557.7 и 630.0 нм [1, 2]. Авторы [1] предположили, что медленно меняющаяся компонента свечений была связана с диффузными сияниями, сияниями типа «d» и стабильной авроральной красной дугой (SAR-arc), а синхронные всплески эмиссий 557.7 и 630.0 нм длительностью порядка часа — с сияниями типа «а». На рис. 1 показано, что оптические измерения проводились в главную фазу магнитной бури, а именно на её второй ступени, начавшейся после 12:00 UT.

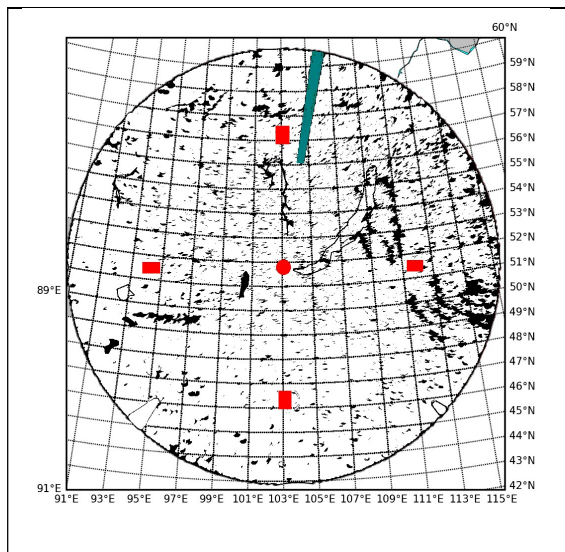


**Рис. 1.** Изменения: интенсивностей эмиссий 630 и 557.7 нм в северном направлении, измеренных патрульным спектрометром (а); Dst и SYM-H индексов (б).

Согласно опубликованным статьям, с 12:00 до 13:00 UT разность потенциалов поперек северной/южной полярной шапки увеличилась от 50 до 180/240 кВ. Вследствие этого, к 16:00 UT возвратная конвекция продвинулась до  $\varphi' \sim 30\text{-}40^\circ/40\text{-}50^\circ$  в вечернем/утреннем секторе, ночной авроральный овал расширился до  $\varphi' \sim 50^\circ$ , центры джетов сместились до  $\varphi' \sim 55^\circ$  [3–6].

Для изучения динамики главного ионосферного провала (ГИП) часто используются карты полного электронного содержания (ПЭС) [7, 8]. Полярная стенка ГИП сопряжена с областью мягких авроральных электронов плазменного слоя, экваториальная — с плазмопаузой [9]. Усиленные потоки корпускулярной и электромагнитной энергии, поступающие из этих магнитосферных доменов на ионосферные высоты, вызывают усиление соответствующих им атмосферных эмиссий. Диффузное свечение наблюдается преимущественно на широтах полярной стенки ГИП, а эмиссии типа «d» и SAR-дуги — на широтах плазмопаузы [2, 10, 11].

Цель нашей работы: (1) — изучить динамику ГИП на меридиане оптических наблюдений по данным ПЭС и ионосферного зондирования; (2) — выполнить сравнительный анализ вариаций интенсивностей эмиссии 630 нм и доплеровских температур в трех излучающих областях, расположенных севернее, в зените и южнее обс. Торы; (3) — определить, связаны ли различия в изменениях интенсивностей и температур в разнесенных по широте излучающих областях с различиями между их положением относительно структурных элементов ГИП.



**Рис. 2.** Поля зрения ИФП (красные фигуры) и САТИ-1М (зеленый луч) на высоте 400 км.

## 2. Данные

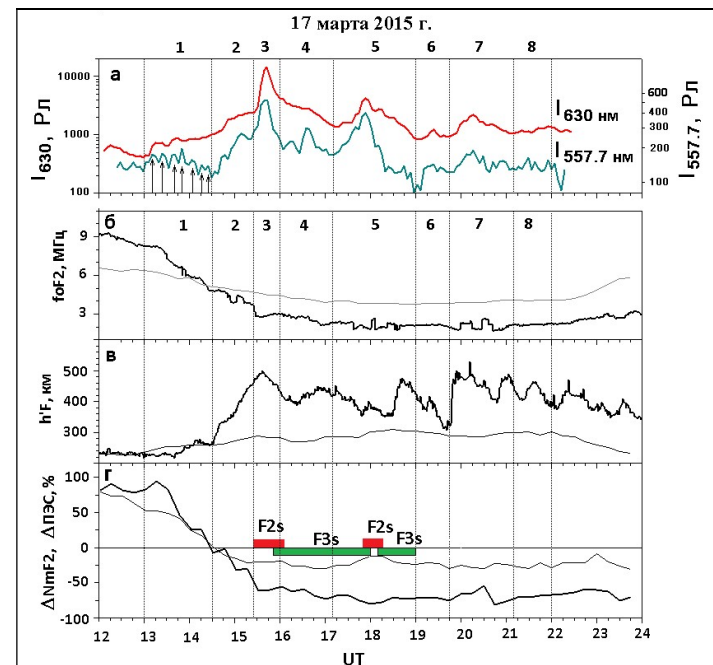
Оптические данные получены с помощью комплекса инструментов, установленных на обс. Торы [1]. Поля зрения входящих в состав комплекса интерферометра Фабри-Перо (ИФП, эмиссия 630 нм) и патрульного спектрометра для атмосферных исследований (САТИ-1М, эмиссии 630 и 557.7 нм) на высоте  $h = 400$  км показаны на рис. 2. Структура ионосферы изучалась по ионограммам, полученным с минутным разрешением на ЛЧМ ионозонде, и 15-ти минутным картам полного электронного содержания, взятым на [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public/](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/).

Для краткости изложения введем следующие обозначения:  $I_{630}$ ,  $I_{557.7}$  — интенсивности эмиссий 630 и 557.7 нм, измеренные с помощью САТИ-1М;  $I_N$ ,  $I_Z$ ,  $I_S$  — интенсивности эмиссии 630 нм, измеренные на ИФП в направлениях север, зенит, юг соответственно;  $T_N$ ,  $T_Z$ ,  $T_S$  — доплеровские температуры в направлениях север, зенит, юг, определенные по измерениям на ИФП.

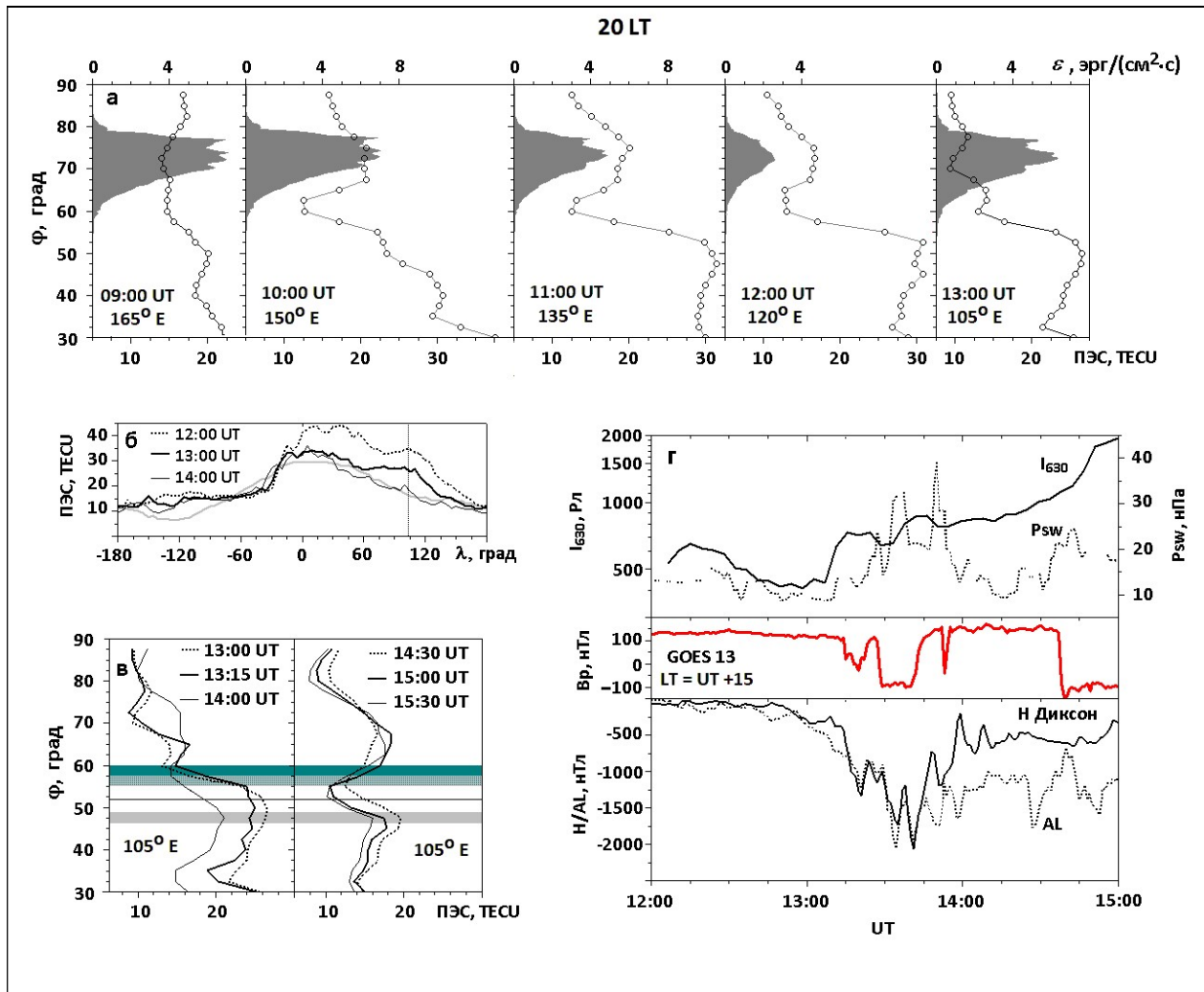
## 3. Динамика ГИП и атмосферных эмиссий

**3.1.** На рис. 3а видно, что заметные изменения  $I_{630}$  и  $I_{557.7}$  начались после 13:00 UT — на меридиане 20:00 LT. Анализ профилей ПЭС (примеры приведены на рис. 4а) показал, что на этом меридиане ГИП сформировался в 09:15 UT и достиг максимальной глубины ~ 45% от ПЭС в вершине полярной стенки в 10:00 UT.

По данным ионосферного зондирования (панели б–г на рис. 3), до 13:00 UT на обс. Торы регистрировалось положительное ионосферное возмущение. На  $\varphi = 52.5^\circ$  оно охватывало сектор ~12–23 LT (рис. 4б). К 14:00 UT значения  $NmF2$  и ПЭС (показаны на рис. 3г) приблизились к фоновым за счет двух факторов — ослабления положительного ионосферного возмущения и смещения его восточной границы до ~ 16:00 LT (рис. 4б). Таким образом, анализируемые нами оптические явления были зарегистрированы после того, как меридиан обс. Торы пересек западную границу LT сектора, в котором уже существовала структура, подобная ГИП, а положительное ионосферное возмущение на широтах 35–55° N постепенно ослабевало и, как показано на рисунках 3б, г и левой панели рис. 4в, фактически исчезло к 14:00 UT.



**Рис. 3.** Изменения: интенсивностей эмиссий 630 и 557 нм, измеренных на САТИ-1М (а); текущих и фоновых (черная и серая линии) значений foF2 (б) и h'F2 (в); относительных отклонений  $\Delta NmF2/\Delta ПЭС$  (черная/серая линия) от фоновых значений (г). Вертикальные линии отмечают границы интервалов, номера которых будут использованы ниже для краткости изложения.



**Рис. 4.** (а) — Динамика профилей ПЭС (линия с кружками) и плотности потока энергии авроральных высыпаний ( $\epsilon$ , серая фигура, вычислена по модели [12]), на меридиане 20 LT. (б) — Долготные профили ПЭС в указанные моменты UT. Серая линия — фоновые значения. (в) — Широтные профили ПЭС. (г) — На верхней, средней и нижней панелях показаны соответственно изменения  $I_{630}$  и  $P_{sw}$ ,  $V_r$  на GOES 13,  $H$  компоненты магнитного поля в Диксоне и  $AL$  индекса. На панели (в) широты областей, сканируемых ИФП/САТИ-1М на  $h = 200\text{--}400$  км, отмечены серым/синим цветом. Черная сплошная линия отмечает широту obs. Торы.

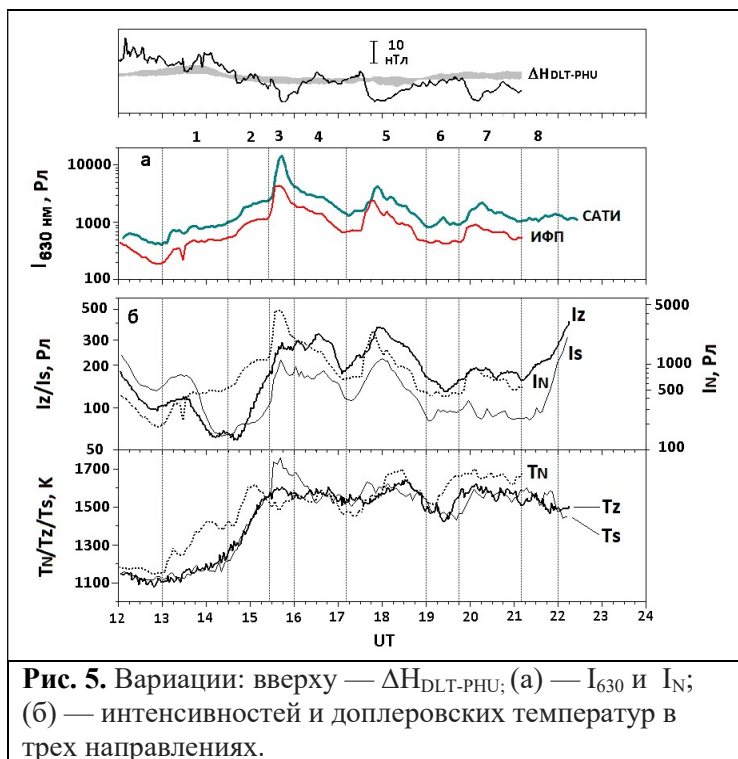
При исследовании мы обнаружили, что изменения  $I_{630}$  и  $I_{557.7}$  связаны с активизациями западного электроджета с разными периодами. Так, заметные увеличения  $I_{630}$  на 300 и 200 Рл в 13:07–13:15 и 13:33–13:42 UT совпадают в пределах временного разрешения данных САТИ-1М (260 с) с понижениями горизонтальной компоненты геомагнитного поля на  $\sim 1100$  нТл, наблюдавшимися на Диксоне в активную фазу суббури (рис. 4г). Каждому из отмеченных на рис. 3а в интервале 1 стрелками колебаний  $I_{557.7}$  соответствует одно из множественных усилений западного электроджета, имеющих такие же периоды.

На рис. 4 г показано соответствие между возмущениями высокоширотного геомагнитного поля и динамического давления солнечного ветра ( $P_{sw}$ ). Мы полагаем, что триггером суббури, множественных усилений западного электроджета, увеличений  $I_{630}$  и флуктуаций  $I_{557.7}$  в интервале 1 могли быть скачки  $P_{sw}$ , вызывавшие сжатия и расширения магнитосферы и, вследствие этого, усиления потоков авроральных электронов, достигающих ионосферных высот. Факт наличия скачков  $P_{sw}$ , подтверждается данными спутника GOES 13.

Подчеркнем, что в интервале 1 изменения  $I_{630}$  и  $I_{557.7}$  наблюдались на экваториальной стенке ГИП на широтах  $\phi \sim 55\text{--}60^\circ$  ( $\phi' \sim 51\text{--}56^\circ$ ;  $L \sim 2.5\text{--}3.2$ ), традиционно относимых к средним широтам. В рассматриваемом нами случае популяция электронов способных проникнуть до  $h = 100\text{--}400$  км и усилить эмиссии 557.7 и 630 нм, могла увеличиться на этих оболочках в течение первого шага главной фазы магнитной бури.

**3.2.** Графики на рис. 4в показывают, что по данным ПЭС (широтное разрешение  $2.5^\circ$ ) с 14:00 до 15:30 UT глубина ГИП увеличилась с 15 до 80%, а его дно сместилось с  $\varphi = 57.5^\circ$  на  $\varphi = 52.5^\circ$ , т.е. фактически до широты обл. Торы. В данных ионосферного зондирования эти процессы проявились в медленном уменьшении критической частоты F2 слоя, закончившимся её резким падением до  $foF2 \sim 2.8$  МГц в 15:30 UT (рис. 3б). Отрицательное ионосферное возмущение развивалось во время плавного увеличения минимальной действующей высоты F области от  $h'F \sim 260$  км в 14:30 UT до  $h'F \sim 500$  км в 15:40 UT (рис. 3в). Примерно в это же время, в 15:25 UT (начало интервала 3), на ионограммах появились F2s отражения, связанные с приближением к точке наблюдения полярной стенки ГИП; затем, в 15:52 UT (конец интервала 3), — F3s-отражения, возникающие в узком провале ионизации [11]. На рис. 3г интервалы наблюдения F2s/F3s показаны прямоугольниками красного/зеленого цвета. В момент появления F2s поля зрения САТИ-1М на  $h = 200\text{--}400$  и  $h = 100$  км перешли соответственно на широты полярной стенки и дна ГИП, где были зафиксированы самые мощные синхронные пики  $I_{630}$  и  $I_{557.7}$ .

Появление F3s отражений косвенно указывает на наличие в секторе оптических наблюдений поляризационного джета и связанного с ним узкого провала ионизации. Однако эффекты поляризационного джета не видны на профилях ПЭС, построенных для меридиана  $105^\circ$  E. Не видны они, также, на распределениях ПЭС вдоль меридиана  $130^\circ$  E, хотя о наличии на нем поляризационного джета в 15:00–19:00 UT 17 марта сообщили авторы доклада [13, 14]. В этом докладе показано, что экваториальная граница наблюдавшегося в средних широтах сияния была “встроена” в область западного дрейфа.



**3.3.** На рис. 5а показано, что изменения интенсивностей эмиссии 630 нм, измеренных САТИ-1М и ИФП в направлении севера, подобны. Оба прибора зарегистрировали в интервалах 3, 5 и 7 пики интенсивности, совпадающие с бухтообразными понижениями  $\Delta N_{DLT-PhU}$  (показана в верхней части рисунка), равной разности горизонтальных составляющих магнитного поля на приэкваториальной обл. Da Lat и низкоширотной обл. Phu Thuy. В ночном секторе отрицательные отклонения  $\Delta N_{DLT-PhU}$  от фоновых значений (серая линия) указывают на усиленную магнитосферную конвекцию. Указанные понижения  $\Delta N_{DLT-PhU}$  соответствуют активным фазам суббурь, развивавшимся вблизи меридиана оптических измерений.

Интервал 3 отличается от интервалов 5, 7 противофазностью изменений  $I_N$  и  $T_N$  (рис. 5б). В нем пику  $I_N$  соответствует понижение  $T_N$ , а изменения  $I_S$  и  $T_S$  синфазны. В интервалах 5, 7 во всех направлениях наблюдались повышенные значения интенсивностей и температур. Выше было отмечено, что в интервале 3 поле зрения ИФП в северном направлении перешло на полярную, а в южном — на экваториальную стенки ГИП. Мы полагаем, что различия между изменениями  $I_N/T_N$  и  $I_S/T_S$  в интервале 3 обусловлены тем, что поля зрения ИФП в северном и южном направлениях находились по разные стороны от дна провала. Широтная структура ГИП в интервалах 5, 7 заметно отличалась от наблюдавшейся в интервале 3 (рис. 6в). В интервале 5 из-за расширения дна провала к северу область измерения  $I_N$  и  $T_N$  сместилась на дно ГИП. В интервале 7 поля зрения ИФП оказались в зоне незначительно меняющихся с широтой значений ПЭС, расположенной между слабо выраженными стенками ГИП.



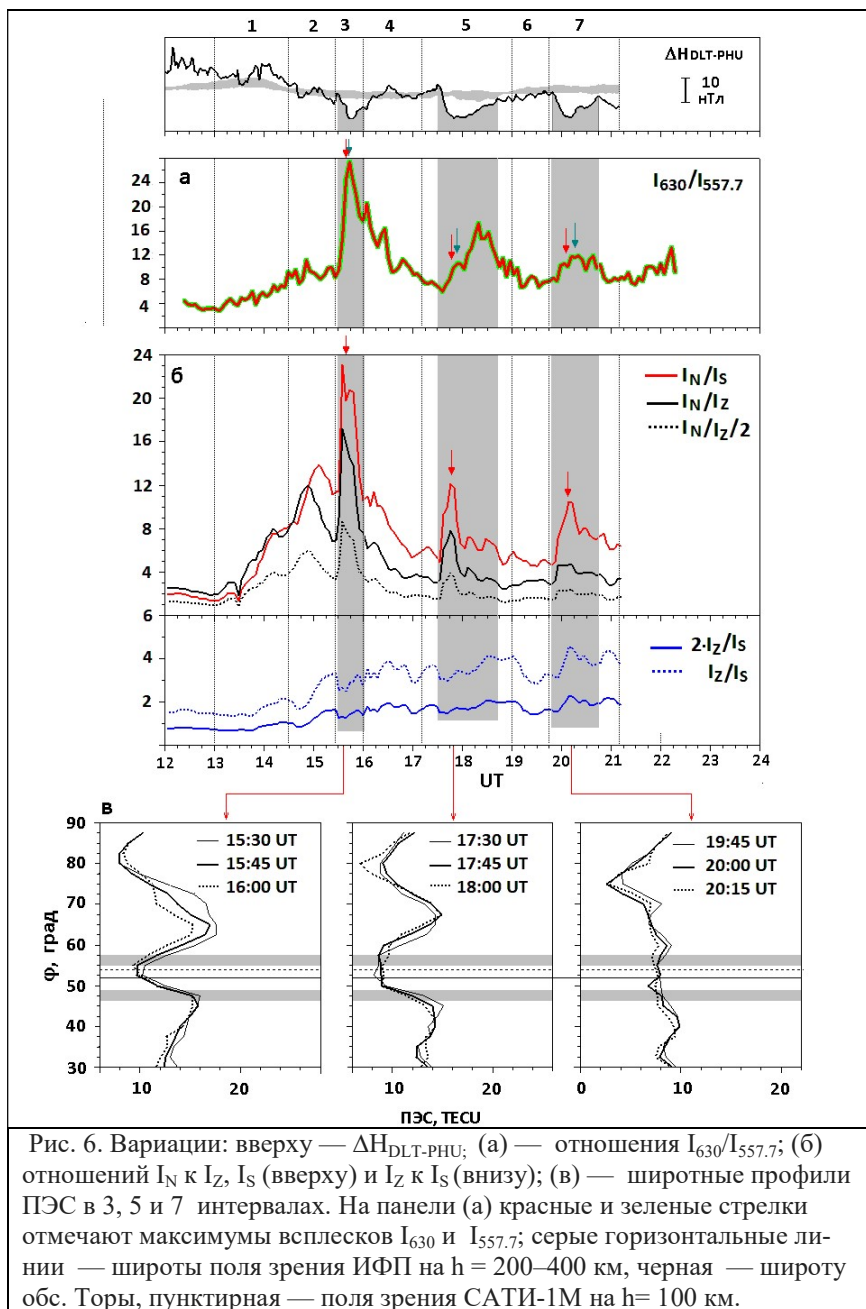


Рис. 6. Вариации: вверху —  $\Delta N_{DLT-PHU}$ ; (а) — отношения  $I_{630}/I_{557.7}$ ; (б) отношений  $I_N$  к  $I_Z$ ,  $I_S$  (вверху) и  $I_Z$  к  $I_S$  (внизу); (в) — широтные профили ПЭС в 3, 5 и 7 интервалах. На панели (а) красные и зеленые стрелки отмечают максимумы всплесков  $I_{630}$  и  $I_{557.7}$ ; серые горизонтальные линии — широты поля зрения ИФП на  $h = 200-400$  км, черная — широту обс. Торы, пунктирная — поля зрения САТИ-1М на  $h = 100$  км.

3.4. Разделение сияний по типам можно проводить на основе анализа отношения интенсивности эмиссии 630 нм к интенсивности эмиссии 557.7 нм. В обычных полярных сияниях, возбуждаемых на высотах менее 150 км,  $I_{630}/I_{557.7} \sim 0.2-1$ , в диффузных сияниях  $\sim 2-4$ , в сияниях типа «d» (красные сияния) 1-10, в SAR-дугах более 10 [2, 10].

Динамика отношения  $I_{630}/I_{557.7}$ , вычисленного по данным САТИ-1М, показана на рис. 6а, отношений интенсивностей  $I_N/I_Z$ ,  $I_N/I_S$ ,  $I_Z/I_S$  — на рис. 6б. Сплошные линии построены по измеренным значениям интенсивностей, точечные — с учетом того, что при угле возвышения  $30^\circ$  длина луча, пересекающего излучающую область, в 2 раза больше, чем в зените. Серые прямоугольники отмечают интервалы усиленной магнитосферной конвекции.

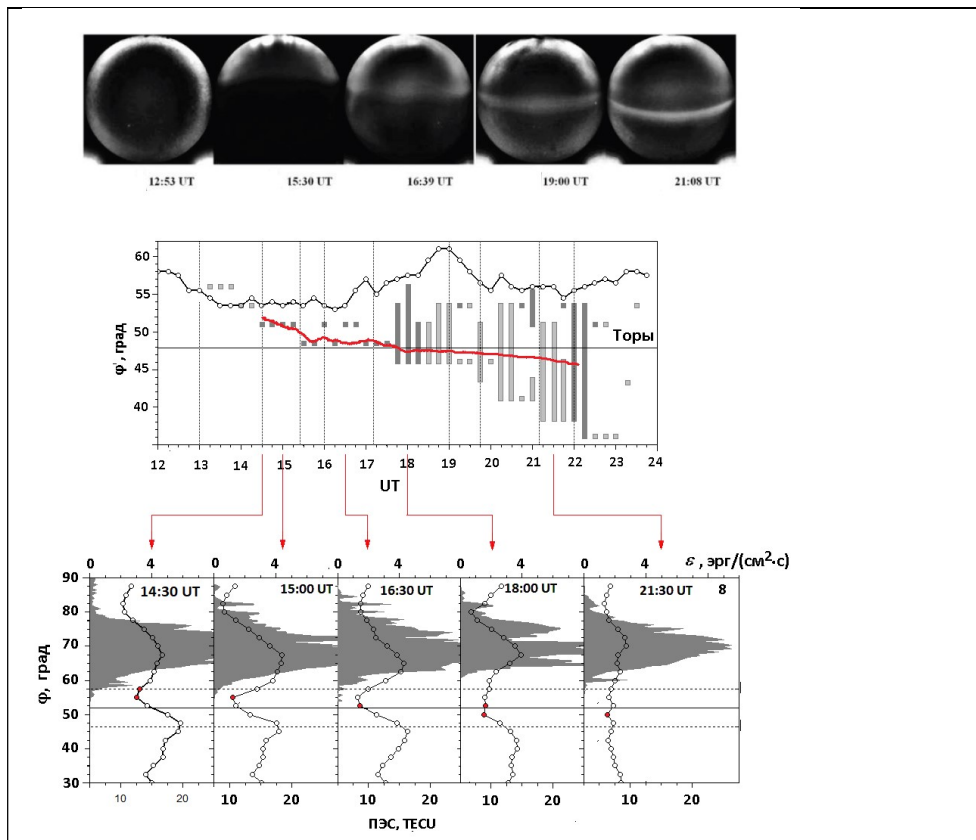
Отметим следующие особенности представленных графиков:

- Пики отношения  $I_{630}/I_{557.7}$  (рис. 6а) наблюдаются в интервалах 3, 5, 7, характеризующихся усиленной магнитосферной конвекцией и синхронными всплесками интенсивностей этих эмиссий. В 3, 5 и 7 интервалах максимумы  $I_{630}$  опережают максимумы  $I_{557.7}$  на 3, 6 и 10 мин соответственно, что, возможно, указывает на распространение зоны высвечивания обеих эмиссий, излучаемых на разных высотах, в сторону экватора. Высота пика  $I_{630}/I_{557.7}$  уменьшается от 27 в интервале 3 до 17 и 12 в интервалах 5 и 7.

- Отношения  $I_N$  к  $I_Z$  и  $I_S$  (рис. 6б) тоже максимальны в интервалах 3, 5 и 7. В интервале 5 они в 2 раза меньше, чем в интервале 3 и всего лишь в 1.2–2 раза больше, чем в интервале 7. Вершины пиков  $I_N/I_Z$  и  $I_N/I_S$  совпадают с пиками  $I_N$  и  $I_{630}$ , высота которых со временем уменьшается (рис. 5а). Это объясняет отмеченное выше уменьшение пиковых значений  $I_N/I_Z$  и  $I_N/I_S$ .

- Сравнивая изменения отношений  $I_{630}/I_{557.7}$ ,  $I_N/I_Z$  и  $I_N/I_S$  в 3, 5 и 7 интервалах с показанными для каждого из них на рис. 6в широтными профилями ПЭС видим, что наблюдавшееся уменьшение указанных параметров со временем могло быть обусловлено изменениями широтной структуры ГИП, описанными в конце предыдущего раздела.

- Судя по представленным графикам, при усилении магнитосферной конвекции усиливается известная тенденция роста интенсивности сияний с широтой. Поэтому в периоды магнитных бурь нужно с большой осторожностью использовать отношение  $I_{630}/I_{557.7}$  для определения типа наблюдаемых в средних широтах сияний в тех случаях, когда  $I_{630}$  и  $I_{557.7}$  измерены при углах возвышения много меньших чем  $90^\circ$ , т.е. на различных широтах.



**Рис. 7.** Вверху: изображения, полученные камерой всего неба. В центре: широтная динамика экваториальной границы авроральных высываний (линия с кружками), дна ГИП (прямоугольники) и центра SAR-дуги (красная линия). Светло-серые прямоугольники соответствуют ГИП с глубиной < 25 %. Внизу: широтные распределения плотности потока энергии авроральных высываний (серая фигура) и ПЭС (линия с кружками) на меридиане 105° E. На распределениях ПЭС красным выделены точки, близкие по широте к центру SAR-дуги на  $h = 400$  км. Пунктирные горизонтальные линии отмечают широту поля зрения ИФП на этой высоте, сплошная горизонтальная линия — широту обс. Торы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-05-00665 с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара”.

3.5. На рис. 7 представлены изображения в эмиссии 630 нм, полученные камерой всего неба (взяты из работы [1]). На трех правых снимках отчетливо видна узкая по широте и протяженная по долготе дуга, являющаяся по морфологическим признакам SAR-дугой [1].

Детальный анализ широтно-временной динамики профилей интенсивности, построенных по изображениям для меридиана 130° E, показал, что узкий пик интенсивности, определенный в [1] как SAR-дуга, появился на фоне диффузной эмиссии в 14:30 UT на  $\varphi = 55.93^\circ$  N ( $\varphi' \sim 51.8^\circ$ ). К концу наблюдений дуга сместилась на  $\varphi = 49.69^\circ$  N ( $\varphi' \sim 45.6^\circ$ ). Графики на средней панели рис. 7 и распределения ПЭС на нижней панели показывают, что в момент зарождения дуга находилась у основания полярной стенки ГИП, в 15:00–18:00 UT в области дна ГИП, а после этого в зоне незначительно меняющихся с широтой низких значений ПЭС, описанной в разделе 3.3.

Особо подчеркнем, что во время оптических измерений SAR-дуга находилась между северным и южным полями зрения ИФП на  $h = 400$  км и могла наблюдаться только в зените обс. Торы.

## Результаты

Анализ оптических данных, данных ионосферного зондирования и карт ПЭС показал, что интенсивность эмиссий 557.7 и 630 нм возросла после того, как обсерватория перешла из зоны положительного ионосферного возмущения, сформировавшегося на меридиане 103° E в вечерние часы, в главный ионосферный провал (ГИП).

По данным ИФП и меридиональным профилям ПЭС установлено, что соотношения между интенсивностями эмиссии 630 нм, зарегистрированными в направлениях север, зенит и юг зависит от положения обследуемых областей относительно дна ГИП.

Показано, что SAR дуга первоначально появилась вблизи основания полярной стенки ГИП.

Обнаружено, что самые мощные синхронные увеличения интенсивностей двух эмиссий были вызваны активизациями западного электроджета во время усиления поля магнитосферной конвекции.

## Литература

1. Михалев А.В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В., Жеребцов Г.А., Подлесный С.В., Тащилин М.А., Артамонов М.Ф. Спектральные и фотометрические характеристики среднеширотного сияния во время магнитной бури 17 марта 2015 г. // Солнечно-земная физика. 2018. Т.4, № 4. С. 54–61.
2. Михалев А.В. Среднеширотные сияния в 23–24-х солнечных циклах по данным наблюдений на юге Восточной Сибири // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 4, с. 80–89.
3. Hairston M., Coley W. R., Stoneback R. Responses in the polar and equatorial ionosphere to the March 2015 St. Patrick Day storm. *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2016. V. 121. P. 11,213–11,234. DOI:10.1002/2016JA023165.
4. Jacobsen K.S., Andalsvik Y. L. Overview of the 2015 St. Patrick's Day storm and its consequences for RTK and PPP positioning in Norway // *J. Space Weather Space Clim*. 2016. V. 6, N A9. DOI: 10.1051/swsc/2016004.
5. Le G., Lühr H., Anderson B.J., Strangeway R.J., et al. Magnetopause erosion during the March 17, 2015 magnetic storm: Combined field-aligned currents, auroral oval, and magnetopause observations // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43, I. 4. P. 2396–2404. DOI: 10.1002/2016GL068257.
6. Золотухина Н.А., Куркин В.И., Полех Н.М., Романова Е.Б. Динамика обратного рассеяния во время большой геомагнитной бури по данным Екатеринбургского радара: 17–22 марта 2015 г. // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 24–42.
7. Mendillo M., Baumgardner J., Wroten J., Martinis C., Smith S., Merenda K.D., Fritz T., Hairston M., Heelis R., Barbieri C. Imaging magnetospheric boundaries at ionospheric heights // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2013. V. 118, I 11. P. 7294–7305. DOI: 10.1002/2013JA019267.
8. Pryse S. E., Kersley L., Malan D., Bishop G. J. Parameterization of the main ionospheric trough in the European sector // *Radio Sci.* 2006. 41, RS5S14, doi:10.1029/2005RS003364.
9. Деминов М.Г. Ионосфера Земли: Особенности и механизмы. Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли. Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75. Москва, 2015. С. 295–346
10. Зверев В.Л., Фельдштейн Я.И., Воробьев В.Г. Авроральное свечение к экватору от овала полярных сияний // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2012. Т. 52, № 1. С. 64–72.
11. Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы // Якутск: Издательский дом СВФУ. 2017. 176 с.
12. Newell P. T., Sotirelis T., Wing S. Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: The global precipitation budget. *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114, A09207. DOI:10.1029/2009JA014326.
13. Nishitani N., Hori T., Kataoka R., Ebihara Y., Shiokawa K., Otsuka Y., Suzuki H. Ionospheric convection associated with low-latitude aurora observed at Rikubetsu, Hokkaido, Japan during the 2015 St. Patrick's Day storm. American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract id.SA31D-2370, 12/2015. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016AGUFMSA31B2395N/abstract>.
14. <http://polaris.nipr.ac.jp/~SD/sdjapan/workshop/2016NIPR/14-Nishitani.pdf>