

ОСОБЕННОСТИ ЭМИССИЙ 630.0 И 557.7 нм В ОБЛАСТИ ГЛАВНОГО ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА: 17 МАРТА 2015 г.

PECULIARITIES OF 630.0 AND 557.7 nm EMISSIONS IN THE MAIN IONOSPHERIC TROUGH: MARCH 17, 2015

Н.А. Золотухина

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, zolot@iszf.irk.ru*

Н.М. Полех

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, polekh@iszf.irk.ru*

А.В. Михалев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, mikhalev@iszf.irk.ru*

А.Б. Белецкий

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, beletsky@iszf.irk.ru*

С.В. Подлесный

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, step8907@mail.ru*

N.A. Zolotukhina

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, zolot@iszf.irk.ru*

N.M. Polekh

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, polekh@iszf.irk.ru*

A.V. Mikhalev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, mikhalev@iszf.irk.ru*

A.B. Beletsky

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, beletsky@iszf.irk.ru*

S.V. Podlesny

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, step8907@mail.ru*

Аннотация. Особенности эмиссий 557.7 и 630.0 нм, наблюдавшихся 17 марта 2015 г. в среднеширотной Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (с. Торы, 52° N, 103° E) на второй ступени главной фазы магнитной бури, сопоставлены с изменениями ионосферных параметров над этой станцией, выявленными по данным ионосферного зондирования и картам полного электронного содержания. Обнаружено, что интенсивности эмиссий 557.7 и 630.0 нм возросли после того, как обсерватория оказалась в долготном секторе развитого главного ионосферного провала (ГИП). Самые мощные синхронные увеличения интенсивностей двух эмиссий были связаны с активизациями западного электроджета во время усиления магнитосферной конвекции. Исследована зависимость соотношений между интенсивностями эмиссии 630.0 нм, зарегистрированными в направлениях на север, в зенит и на юг, от положения излучающих областей относительно дна ГИП. Показано, что SAR-дуга, первоначально появившись вблизи основания полярной стенки ГИП, приблизилась к зениту станции одновременно с появлением на ионограммах F3s-отражений, являющихся индикатором наличия поляризационного джета вблизи наблюдательного пункта.

Ключевые слова: вторая ступень главной фазы магнитной бури, эмиссии 557.7 и 630.0 нм, главный ионосферный провал, поляризационный джет.

Abstract. Peculiarities of 557.7 and 630.0 nm emissions observed in the second step of the magnetic storm main phase at the mid-latitude observatory Tory (52° N, 103° E) on March 17, 2015 are compared with the changes in ionospheric parameters above this station, detected from ionospheric sounding data and total electron content maps. We have found that the intensity of the 557.7 and 630.0 nm emissions noticeably increased after the observatory entered into the longitudinal sector of the developed main ionospheric trough (MIT). The most powerful synchronous increases in intensities of the two emissions are associated with amplification of the westward electrojet during strengthening of the magnetospheric convection. We study the dependence of the ratios between the intensities of 630.0 nm emission recorded in the north, zenith, and south directions on the position of emitting regions relative to the MIT bottom. The SAR arc is shown to appear initially near the bottom of the MIT polar wall and approach the zenith of the station during registration of F3s reflections by an ionosonde, which indicate the presence of a polarization jet near the observation point.

Keywords: second step of the magnetic storm main phase, 557.7 and 630.0 nm emissions, main ionospheric trough, polarization jet.

ВВЕДЕНИЕ

В ночные часы 17 марта 2015 г. комплекс оптических инструментов, размещенных в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (ГФО, с. Торы, географические координаты $\varphi=52^\circ$ N, $\lambda=103^\circ$ E, исправленная геомагнитная широта $\varphi'=47.9^\circ$), за-

фиксировал интенсивные эмиссии атомарного кислорода 557.7 и 630.0 нм, определенные как среднеширотное сияние [Михалев и др., 2018; Михалев, 2019]. Основываясь на пространственно-временной динамике интенсивностей, авторы указанных статей пришли к выводу, что наблюдавшиеся в этот день синхронные всплески эмиссий 557.7 и 630.0 нм

длительностью порядка часа были сияниями типа «а», а медленно меняющаяся компонента эмиссии 630.0 нм была представлена диффузным свечением и/или сиянием типа «d», а также стабильной авроральной красной дугой (SAR-arc). Отметим, что среднеширотными сияниями называют сияния, которые наблюдаются из областей, расположенных намного ниже «типичной авроральной зоны» [Suzuki et al., 2015].

Согласно накопленной к настоящему времени информации, обнаруженные в [Михалев и др., 2018; Михалев, 2019] типы сияний связаны с потоками электронов определенных энергий, вторгающимися в атмосферу из различных магнитосферных структур [Bame et al., 1967; Rassoul et al., 1993; Frey, 2007; Фельдштейн и др., 2010; Feldstein et al., 2014; Mishin et al., 2018; Михалев, 2019]. Сияния типа «а» возбуждаются электронами с энергиями ~0.1–10 кэВ, поступающими в авроральный овал из центрального плазменного слоя после значительного ускорения. Критерии, используемые для идентификации центрального плазменного слоя, приведены, например, в [Baumjohann et al., 1989]. Диффузные сияния вызываются электронами с энергиями 0.01–1 кэВ, без ускорения поступающими из плазменного слоя на ионосферные высоты [Старков, 2000]. Отметим, что диффузные сияния наблюдаются в протяженной широтной области, проецирующейся вдоль магнитного поля на весь центральный плазменный слой [Ni et al., 2016]. Сияния типа «d» и SAR-дуги возникают при воздействии на атмосферу электронов с энергиями ~0.01–1 кэВ и ≤0.01 кэВ соответственно, высыпаящихся из окрестности плазмопаузы [Rassoul et al., 1993]. На ионосферных высотах зоне диффузных сияний (диффузных высыпаний) соответствует полярная стенка главного ионосферного провала (ГИП), а плазмопаузе — его экваториальная стенка [Khalipov et al., 1985; Фельдштейн и др., 2010; Mendillo et al., 2013; Деминов, 2015].

На рис. 1, а, б показано, что анализируемые оптические данные были получены на главной фазе двухступенчатой магнитной бури (two-step storm main phases [Gonzalez et al., 2002]), а именно на ее второй ступени (второе понижение *Dst*-индекса). В начале этой ступени, с 12:00 до 13:00 UT, разность потенциалов поперек северной и южной полярных шапок увеличилась от 50 до более чем 150 кВ и оставалась большой до конца 17 марта [Hairston et al., 2016]. В северной полушарии в 15:00–16:00 UT возвратная конвекция продвинулась до исправленной геомагнитной широты $\phi' \sim 30\text{--}40^\circ/40\text{--}50^\circ$ в вечернем/утреннем секторах [Hairston et al., 2016], ночной авроральный овал расширился до $\phi' \sim 50^\circ$ [Le et al., 2016; Kosar et al., 2018], центры авроральных электроджетов сместились до $\phi' \sim 55^\circ$ [Jacobsen, Andalsvik, 2016; Золотухина и др., 2016; Zolotukhina et al., 2017]. Примерно в это же время ГИП сместился на $\lambda=120^\circ$ Е до $\phi=52^\circ$ N ($\phi' \sim 48^\circ$) [Полех и др., 2016], а интенсивности эмиссий 557.7 ($I_{557.7}$) и 630.0 нм ($I_{630.0}$), наблюдавшихся в ГФО в северном направлении, резко увеличились до максимальных для рассматриваемого события значений ~0.5 и 14 кРл соответственно [Михалев и др., 2018; Михалев, 2019].

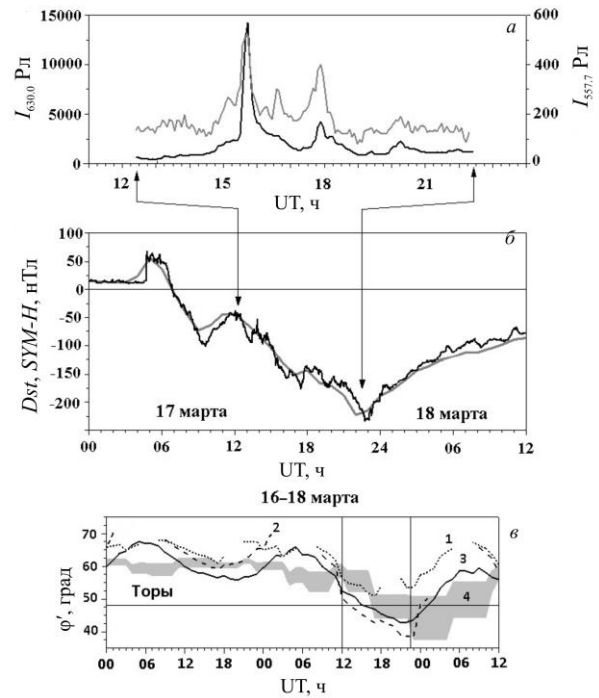


Рис. 1. Изменения: а — интенсивностей эмиссий 630.0 и 557.7 нм (черная и серая линии) в северном направлении, измеренных патрульным спектрографом 17 марта 2015 г.; б — *SYM-H* и *Dst*-индексов (черная и серая линии); в — исправленных геомагнитных широт ϕ' экваториальной границы зоны диффузных высыпаний (1), дна ГИП (2, 3) и плазмопаузы (4), определенных для меридиана 105° Е по моделям [Gussenhoven et al., 1983; Жеребцов и др., 1986; Deminov, Shubin, 2018; Moldwin et al., 2002]. Вертикальные линии отмечают начало и конец оптических наблюдений (12:00–22:30 UT 17 марта); горизонтальная — широту ГФО (Торы)

Судя по результатам расчетов (рис. 1, в), выполненных для близкого к ГФО меридиана 105° Е по эмпирическим моделям, основанным на значениях K_p - или *ap*-индекса, 17 марта широты экваториальной границы зоны диффузных высыпаний, дна ГИП и плазмопаузы могли быть на $10^\circ\text{--}20^\circ$ меньше, чем в соответствующие часы 16 марта. При этом в 15:00–18:00 UT (22:00–01:00 LT) граница диффузных высыпаний могла находиться на $3\text{--}5^\circ$ севернее ГФО, а плазмопауза и дно ГИП с 15:00 UT (22:00 LT) — вблизи или южнее нее.

Смещение ГИП на средние широты является редким событием. Вычисления, сделанные по модели [Deminov, Shubin, 2018], показывают, что на $\lambda=105^\circ$ Е дно ГИП может сместиться до $\phi'=50^\circ$ в вечерние часы только при $K_p \geq 8$ ($ap \geq 207$), т. е. во время очень сильных и экстремальных магнитных бурь [https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation]. Еще более редкими являются установленные случаи появления в средних широтах сияний интенсивностью больше 1 кРл, поскольку возможность их наблюдения ограничена ночными часами и погодными условиями (облачностью). Например, в течение двух последних солнечных циклов в ГФО было зарегистрировано только семь таких случаев. Все они наблюдались во время очень сильных и экстремальных магнитных бурь с минимумами $Dst < -222$ нТл,

в том числе в анализируемую нами бурю [Михалев, 2019].

Указанные обстоятельства делают актуальными исследования связей между динамикой среднеширотных сияний и магнитосферно-ионосферных возмущений для каждого отдельного случая. В данной работе такое исследование будет проведено для сияний, наблюдавшихся в среднеширотной Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН 17 марта 2015 г. на второй ступени главной фазы геомагнитной бури, т. е. на фазе вторичного усиления кольцевого тока. Основная цель работы — проверка связей между динамикой авроральных свечений и структурных элементов ГИП. Для решения этой задачи будет проведен сравнительный анализ пространственно-временной динамики интенсивностей эмиссий 557.7 и 630.0 нм, наблюдавшихся в ГФО, изменений ионосферных параметров над этой обсерваторией, полного электронного содержания (ПЭС) вдоль меридиана 105° Е и геомагнитных возмущений, наблюдавшихся восточнее и западнее ГФО.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

1.1. Рассматриваемые оптические данные получены на комплексе инструментов, описанных в [Михалев и др., 2018]. Для количественного анализа использованы значения I_N , I_Z , I_S (интенсивности эмиссии 630.0 нм) и T_N , T_Z , T_S (доплеровские температуры, определенные по линии 630.0 нм), измеренные с помощью интерферометра Фабри—Перо (ИФП) в направлениях на север, в зенит, на юг соответственно [Васильев и др., 2017]. Кроме них анализировались вариации интенсивностей эмиссий 557.7 и 630.0 нм ($I_{557.7}$ и $I_{630.0}$), измеренных на патрульном спектрографе для атмосферных исследований (САТИ-1М) на зенитных углах 63°–71° [Михалев и др., 2018]. В рассматриваемый период ИФП (угол зрения 3°) работал на длине волны 630.0 нм в режиме патрульного обзора пяти направлений — стороны горизонта (угол возвышения $\psi=30^\circ$, шаг дискретизации данных $\Delta t=254$ с) и зенит ($\psi=90^\circ$, $\Delta t=127$ с). Патрульный спектрограф ($\psi\sim 23^\circ$, наклон к географическому меридиану $\sim 8^\circ$, угловое поле зрения $\sim 25^\circ$, $\Delta t=260$ с) был ориентирован в северном направлении.

Изображения, полученные камерой всего неба КЕО Sentinel (направление визирования — зенит, поле зрения 145°, время экспозиции 30 с, спектрофотометрическая калибровка проведена по снимкам звездного неба [Шиндин и др., 2017]), были использованы для анализа пространственно-временной динамики SAR-дуги; широкоугольной цветной камерой ФИЛИН-1Ц (угловое поле зрения $\sim 85^\circ$, время экспозиции 300 с) — для исследования пространственно-временных вариаций среднеширотных эмиссий. На севере поле зрения ФИЛИН-1Ц ограничено горным массивом Саяны ($\psi\sim 10.5^\circ$).

1.2. Согласно разным литературным источникам, эмиссии 557.7 и 630.0 нм возбуждаются на высотах $h=90$ –240 км и $h=150$ –400 км соответственно, а SAR-дуги — на $h=400$ –450 км [Алексеев и др., 1975; Khomich et al., 2008; Зверев и др., 2012; Mendillo et al., 2013; Feldstein et al., 2014; Тащилин,

Леонович, 2016; Megan Gillies et al., 2017; Aruliah et al., 2019]. Следуя работе [Mendillo et al., 2013], будем считать, что максимумы интенсивности эмиссии 630.0 нм расположены на $h=200$ км (диффузные свечения) и $h=400$ км (SAR-дуги), а эмиссии 557.7 нм — на $h=100$ км.

В сферически-слоистом приближении при этих высотах и указанных в разделе 1.1 углах данные САТИ-1М были получены с широт, отстоящих от широты ГФО на $\Delta\varphi\sim 1.7$ –2.4° (эмиссия 557.7 нм), $\Delta\varphi=3.2$ –4.5° (диффузные свечения) и 6–8° (SAR-дуга). Данные ИФП, полученные с северного и южного направлений, соответствуют областям, отстоящим от ГФО на $\Delta\varphi\sim 2.9^\circ$ при $h=200$ км и 5.4° при $h=400$ км. Направлению в зенит соответствует широта ГФО ($\varphi=47.9^\circ$) и долгота 103° Е. Поле зрения камеры КЕО Sentinel ограничено на севере и на юге $\Delta\varphi=5.1^\circ$ на $h=200$ км и $\Delta\varphi=9^\circ$ на $h=400$ км, а камеры ФИЛИН-1Ц — на севере $\Delta\varphi=4.2^\circ$ на $h=100$ км, $\Delta\varphi=6.3^\circ$ на $h=200$ км и $\Delta\varphi=10.8^\circ$ на $h=400$ км.

1.3. При исследовании использовались значения параметров межпланетной среды и индексов геомагнитной активности, взятые на сайте [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public]. Там же были взяты данные о вариациях направленной на геомагнитный полюс H -компоненты геомагнитного поля в обсерваториях Тикси и Диксон (приведены для THEMIS с шагом дискретизации $\Delta t=60$ с) и временные ряды ПЭС с широтным, долготным и временным разрешениями 2.5°, 5° и 15 мин соответственно (приведены для GPS-deduced 15-minute Total Electron Content (TEC) global maps). Значения X -, Y - и Z -компонент геомагнитного поля (направлены соответственно на северный географический полюс, на восток и вертикально вниз), измеренных в обсерваториях Якутск, Da Lat и Phu Thuy с $\Delta t=60$ с, были получены с сайта [https://www.intermagnet.org/data-donnee/download-eng.php]; магнитные данные GOES-13, -15 с $\Delta t=60$ с — с [ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse].

Динамика ГИП изучалась по распределениям ПЭС, которые часто используются для этой цели [Pryse et al., 2006; Mendillo, 2006; Shinbori et al., 2018], и по значениям критических частот F2-слоя (f_oF2) и минимальных действующих высот F-области ($h'F$). Эти данные получены с одноминутным разрешением путем ручной обработки ионограмм ЛЧМ-ионозонда, установленного в ГФО [Подлесный и др., 2013].

Распределения плотности потока энергии авроральных высыпаний (ϵ) строились по данным [https://www.ngdc.noaa.gov/stp/ovation_prime/data] (рассчитаны по модели [Newell et al., 2009]). Для определения широты экваториальной границы диффузных высыпаний использован критерий $\epsilon=0.2$ эрг/(см²·с) [Ding et al., 2017; Kosar et al., 2018]. Для удобства изложения, основываясь на особенностях изменений интенсивностей, мы выделили восемь интервалов UT (13:00–14:30 (1), 14:30–15:25 (2), 15:25–16:00 (3), 16:00–17:10 (4), 17:10–19:00 (5), 19:00–19:45 (6), 19:45–21:10 (7), 21:10–22:00 (8)). Границы интервалов отмечены на рисунках вертикальными пунктирными линиями, их номера указаны над панелями.

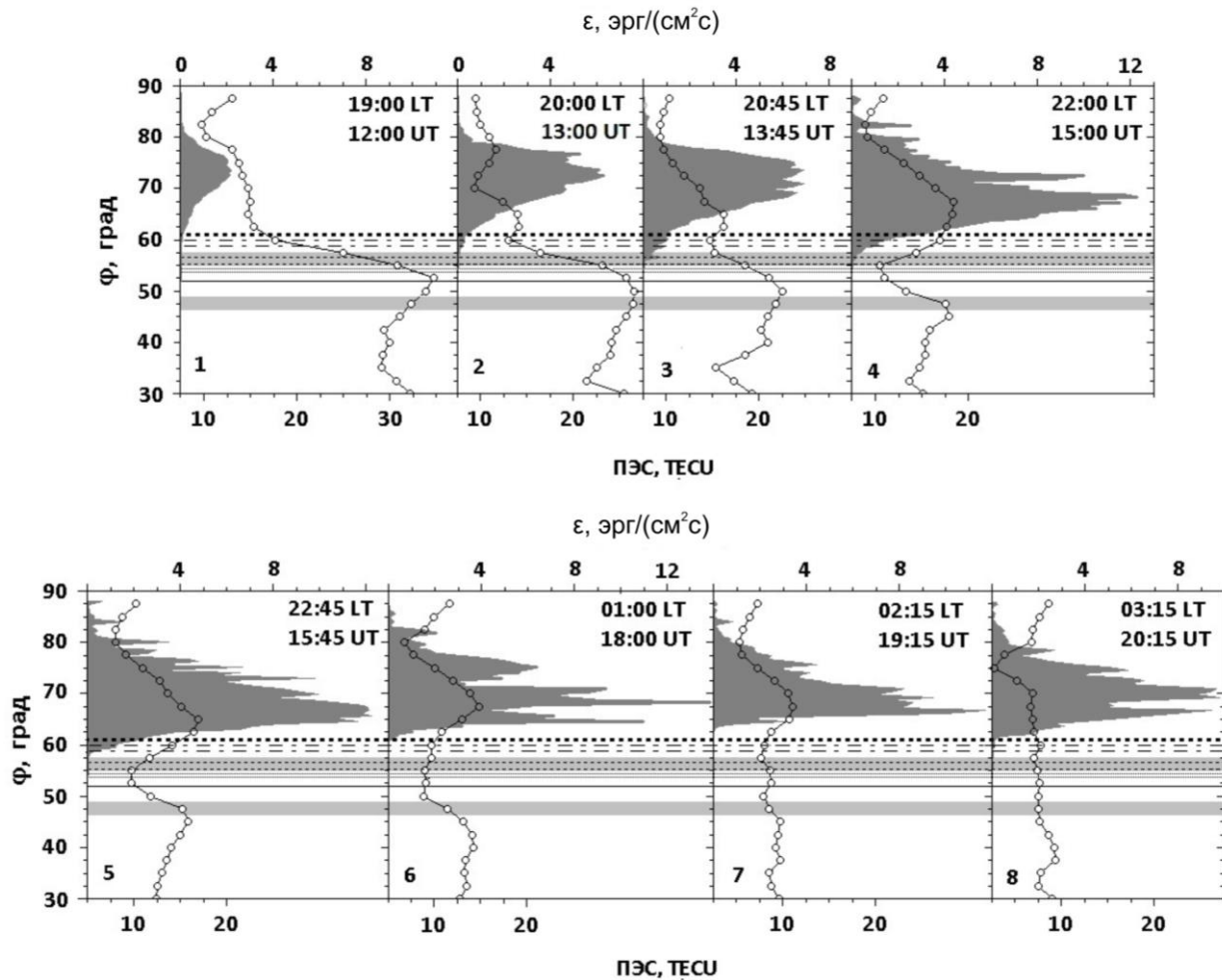


Рис. 2. Примеры построенных для 17 марта 2015 г. широтных распределений ПЭС (линии с белыми кружками) и ϵ (сплошные серые фигуры) на меридиане 105° E. На этом и других рисунках серые полосы отмечают широты областей, находящихся в поле зрения ИФП на высотах $h=200\text{--}400$ км; пары штрихпунктирных, штриховых и пунктирных линий — областей, попадающих в поле зрения САТИ-1М на высотах 400, 200 и 100 км соответственно. Утолщенные сплошная черная и пунктирная линии показывают широты ГФО и северного горизонта камеры КЕО Sentinel на $h=400$ км

2. ДИНАМИКА ГИП НА МЕРИДИАНЕ ГФО

2.1. За время оптических наблюдений, проводившихся в 12:00–22:30 UT 17 марта 2015 г., ГФО прошла через сектор 19:00–05:30 LT. На рис. 1 видно, что заметные изменения $I_{630.0}$ и $I_{557.7}$ произошли после 13:00 UT. С 13:07 до 13:16 UT значения $I_{630.0}$ увеличились на ~ 300 Рл, а на графике $I_{557.7}$ (UT) появились колебания размахом 30–50 Рл ($\sim 20\text{--}30\%$ от среднего значения $I_{557.7} \sim 150$ Рл в 13:00–14:00 UT). На рис. 2 (панель 2) показано, что в 13:00 UT на распределении ПЭС вдоль меридиана 105° E к экватору от зоны авроральных высыпаний (аврорального овала) появилась структура, состоящая из трех характерных для ГИП элементов — минимума ПЭС (дна), полярной и экваториальной стенок [Pryse et al., 2006]. Отметим, что от других высокоширотных провалов ГИП отличается тем, что находится к экватору от овала [He et al., 2011]. За час до этого, в 12:00 UT (панель 1 на рис. 2), структуры, подобной ГИП, на $\lambda=105^\circ$ E не было.

2.2. Изменения широты дна ГИП, определенной по профилям ПЭС, и широты экваториальной границы зоны диффузных высыпаний показаны на рис. 3, а. В тех случаях, когда минимальное значение ПЭС наблюдалось в одной точке (см., например, панели 2, 4 на рис. 2), широта дна ГИП показана квадратами. Если значения ПЭС, отличающиеся не более чем на 5 % от минимального, наблюдаются в нескольких смежных точках (см. панели 5, 6, 8 на рис. 2), то их широты соединены прямоугольниками. Значения ПЭС в области дна ГИП были на 10–75 % ниже, чем в вершине полярной стенки. Темно-серые квадраты (прямоугольники) на рис. 3, а соответствуют понижениям ПЭС в зоне дна на 25–75 %; светло-серые — на 10–24 %. Глубина ГИП была максимальной в 15:30–15:45 UT.

Основываясь на показанных на рис. 3, а перемещениях дна ГИП и учитывая, что карты ПЭС имеют широтное разрешение 2.5° , мы полагаем, что в 15:30–17:30 UT ГФО находилась вблизи дна ГИП, а после этого — в широкой зоне низкого ПЭС, которая, возможно, тоже является дном ГИП. Расши-

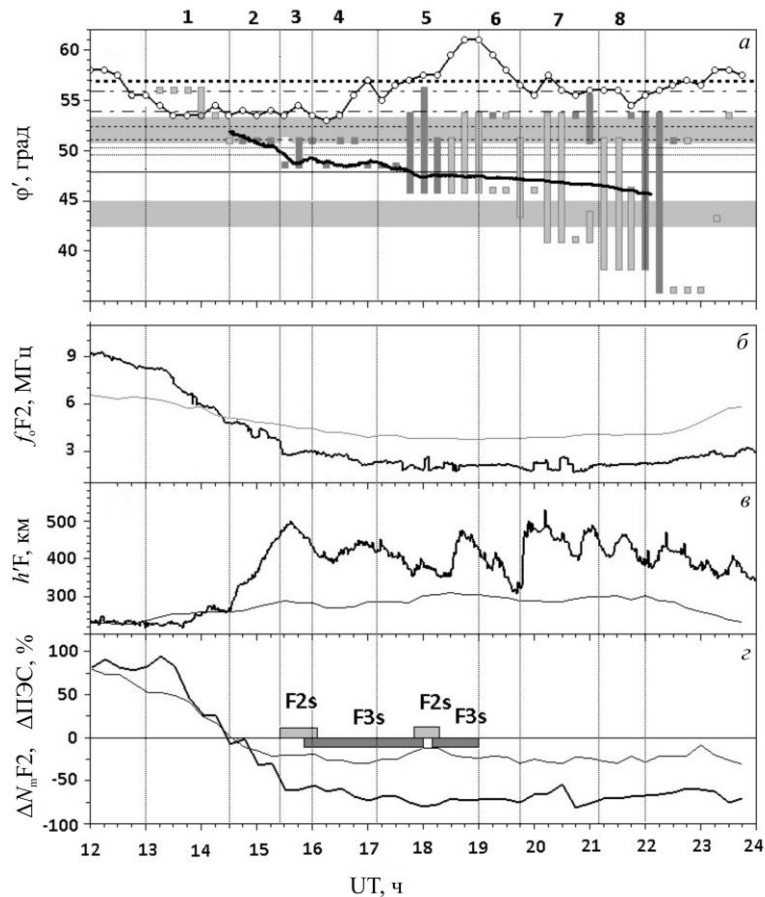


Рис. 3. Изменения 17 марта 2015 г.: *a* — исправленных геомагнитных широт экваториальной границы зоны диффузных высыпаний, вычисленной по модели [Newell et al., 2009] (линия со светлыми кружками), дна ГИП (квадраты и прямоугольники) и центра SAR-дуги (утолщенная линия); *b*, *в* — текущих/фоновых (черная/серая линия) величин f_0F2 (*a*) и $h'F2$ (*b*); *г* — нормированных отклонений N_mF2 и ПЭС (черная и серая линии) от фоновых значений. Фоновые значения f_0F2 , $h'F2$, N_mF2 и ПЭС равны их средним величинам, полученным 13–15 марта. На панели *г* светло-серые и темно-серые прямоугольники показывают интервалы регистрации F2s- и F3s-отражений соответственно. Вертикальные линии отмечают границы интервалов, различающихся по особенностям наблюдавшихся в них геомагнитных возмущений и атмосферных свечений

рение ГИП и уменьшение его глубины после полуночи, подобное показанному на панелях 6–8 рис. 2, описаны в [Pryse et al., 2006].

2.3. Факт смещения структуры, подобной ГИП, до широты ГФО, установленный по распределениям ПЭС, подтверждается данными ионосферного зондирования, показанными на рис. 3, *b*, *в*. Видно, что в 12:00 UT (19:00 LT) ГФО находилась под зоной положительного ионосферного возмущения, которое полностью исчезло к 14:00 UT. Во время установленного по распределениям ПЭС уменьшения широты дна ГИП от $\phi' \sim 53.5^\circ$ в конце интервала 1 до $\phi' \sim 48.5\text{--}51^\circ$ в начале интервала 3 в ГФО наблюдались изменения f_0F2 и $h'F$, характерные для ГИП. С 14:15 до 15:30 UT критическая частота F2-слоя уменьшилась на ~ 2 МГц, а $h'F$ плавно увеличилась на ~ 240 км. После 15:30 UT и до конца дня значения f_0F2 были на ~ 2 МГц меньше, а $h'F$ — на 100–200 км больше фоновых.

Отражения от регулярного (фонового) F2-слоя видны на всех ионограммах, полученных одновременно с оптическими измерениями. До 15:18 UT ионограммы не имели существенных помех. Отражения от F2-слоя стали диффузными после

резкого уменьшения f_0F2 (на 1 МГц за 5 мин) в начале интервала 3, которое наблюдалось на фоне максимальных значений $h'F$. Кроме них на ионограммах, полученных в 15:25–16:05 и 17:50–18:17 UT, присутствуют наклонные отражения с большими по сравнению с отражениями от регулярного F2-слоя частотами и примерно такими же задержками. Эти отражения подобны F2s-отражениям, представленным в работах [Филиппов и др., 1984; Степанов и др., 2017]. В 15:52–18:00 и 18:08–19:00 UT на ионограммах видны F3s-отражения — дополнительные следы, лежащие в области меньших частот и больших задержек, чем отражения от F2-слоя [Филиппов и др., 1984; Степанов и др., 2017]. На рис. 3, *г* интервалы наблюдения F2s- и F3s-отражений отмечены светло-серыми и темно-серыми прямоугольниками. Появление F2s-отражений в интервалах 3 и 5 указывает на близость полярной стенки ГИП к пункту наблюдения, а F3s-отражений в интервалах 4 и 5 — на узкий провал ионизации, образующийся в области поляризационного джета [Филиппов и др., 1984; Степанов и др., 2017].

На рис. 3, *г* сопоставлены графики нормированных отклонений электронной концентрации в мак-

симуме F2-слоя и ПЭС ($\Delta N_m F2$ и $\Delta PЭС$) от их фоновых значений: $\Delta N_m F2$ определены по значениям $f_o F2$ ($N_m F2 = 1.24 \cdot 10^4 \cdot f_o F2^2 \text{ см}^{-3}$); $\Delta PЭС$ — по значениям ПЭС в точке с координатами $\varphi = 52.5^\circ$, $\lambda = 105^\circ$. Видно, что тенденции изменений $\Delta N_m F2$ и $\Delta PЭС$ подобны, но после 15:30 UT глубина понижения $N_m F2$ (~60–75 %) в 3–4 раза больше, чем глубина понижения ПЭС (~15–25 %). Отсюда следует, что провал в максимуме электронной концентрации F2-слоя мог быть глубже, чем провал в ПЭС. Выявленные проявления ионосферных возмущений показывают, что после 15:25 UT ГФО вошла в зону ГИП и, возможно, оставалась в ней до конца суток.

3. ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В СЕКТОРЕ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

3.1. На рис. 4 изменения $I_{557.7}$ и $I_{630.0}$ сопоставлены с вариациями горизонтальной составляющей магнитного поля в высоких широтах. В рассматриваемом временном интервале в обсерваториях Тикси ($\varphi = 71.6^\circ \text{ N}$, $\lambda = 128.8^\circ \text{ E}$, $\varphi' = 66.5^\circ$) и Якутск ($\varphi = 62^\circ \text{ N}$, $\lambda = 127.9^\circ \text{ E}$, $\varphi' = 56.8^\circ$), расположенных на $\sim 25^\circ$ к востоку от ГФО, и в обсерватории Диксон ($\varphi = 73.5^\circ \text{ N}$, $\lambda = 80.7^\circ \text{ E}$, $\varphi' = 69.4^\circ$), находящейся на $\sim 22^\circ$ западнее нее, наблюдались множественные отрицательные возмущения X (Якутск) или H (Тикси, Диксон) компоненты геомагнитного поля. Следовательно, ГФО находилась все это время в секторе западного электроджета.

3.2. Показанные на рис. 4, в вариации $\Delta H_{DLT-PHU}$, т. е. разности между горизонтальными составляющими геомагнитного поля ($H = (X^2 + Y^2)^{1/2}$), измеренными в обсерваториях Da Lat ($\varphi = 11.9^\circ \text{ N}$, $\lambda = 108.5^\circ \text{ E}$, наклонение 2.19°) и Phu Thuy ($\varphi = 21^\circ \text{ N}$, $\lambda = 106^\circ \text{ E}$, наклонение 11.2°), дают информацию о направлении электрического поля вблизи меридиана магнитных, а в нашем случае и оптических измерений [Blanc, Richmond, 1980; Balan et al., 2010; Polekh et al., 2017]. Серая полоса показывает пределы изменения $\Delta H_{DLT-PHU}$ в магнитоспокойные дни 13–15 марта; черная линия — текущие значения 17 марта. Значительные, глубиной ~ 10 нТл, понижения текущих значений $\Delta H_{DLT-PHU}$ относительно серой полосы в интервалах 3, 5 и 7 указывают на то, что в них усиленное поле магнитосферной конвекции, направленное в ночные часы на запад, было больше, чем направленное на восток поле возмущенного динамо.

3.3. Мощные усиления западного электроджета, проявившиеся в глубоких бухтообразных понижениях H - или X -компоненты геомагнитного поля, были последовательно зафиксированы в интервалах 1, 3, 5 и 7. Во время суббури с множественными началами [McPherron, 1978; Nagai et al., 1983], развивавшейся в интервале 1, наибольшее усиление поля западного электроджета с $\Delta H \sim -2000$ нТл было зарегистрировано в авроральной обсерватории Диксон около 13:40 UT, после перехода от положительного к слабому отрицательному возмущению Z -компоненты геомагнитного поля (указывает на смещение центра западного электроджета с юга

на север относительно обсерватории). В интервале 2 H -компонента геомагнитного поля в Тикси и Диксоне постепенно возвращалась к досуббуревому уровню, а X -компонента в Якутске немонотонно понижалась. Она достигла минимума ($\Delta X \sim -1700$ нТл) около 15:40 UT в интервале 3, в котором, как показывает бухтообразное понижение $\Delta H_{DLT-PHU}$, усилилось поле магнитосферной конвекции, а центр западного джета сместился до минимальных широт и находился в окрестности Якутска [Золотухина и др., 2016]. В этом же интервале наблюдались самые высокие (из наблюдавшихся на САТИ-1М трех пар пиков) синхронные пики $I_{630.0}$ и $I_{577.7}$.

Понижения $\Delta H_{DLT-PHU}$ в интервалах 5 и 7 тоже совпадают по времени с более слабыми, чем в интервале 3, синхронными пиками $I_{630.0}$ и $I_{577.7}$ и бухтообразными понижениями геомагнитного поля, наиболее глубокими ($\Delta H \sim -1700$ и -1200 нТл) в обсерватории Диксон. В отличие от них, первая, самая интенсивная по данным обсерватории Диксон суббуря, наблюдавшаяся в интервале 1, не сопровождалась заметными изменениями экваториального электрического поля и синхронными увеличениями $I_{630.0}$ и $I_{577.7}$.

4. СВЯЗЬ МЕЖДУ ОПТИЧЕСКИМИ, ГЕОМАГНИТНЫМИ И ИОНОСФЕРНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

4.1. Снимки, сделанные камерами ФИЛИН-1Ц и КЕО Sentinel, показывают, что у их северных горизонтов в интервалах 1, 5, 7 наблюдались яркие дискретные структуры, движущиеся с запада на восток. Направление перемещения структур указывает на то, что их первичные источники, связанные с суббурями, находились западнее ГФО (раздел 3.3). В интервале 3 наблюдались яркие красные вертикальные сполохи. Основываясь на приведенных в разделе 1.2 оценках расстояний до северных горизонтов САТИ-1М, ФИЛИН-1Ц и показанных на рис. 3, а изменениях широты экваториальной границы зоны диффузных высыпаний, мы полагаем, что перечисленные выше дискретные структуры обусловлены усилениями авроральных высыпаний во время суббурь.

4.2. В разделе 3.3 мы отметили, что отчетливые синхронные пики $I_{557.7}$ и $I_{630.0}$ наблюдались в интервалах 3, 5, 7 во время бухтообразных понижений H - или X -компонент геомагнитного поля, совпадающих по времени с усилениями поля магнитосферной конвекции. В интервалах 3, 5, 7 всплеском $I_{557.7}$ и $I_{630.0}$ предшествовали уменьшения широты экваториальной границы зоны диффузных высыпаний, характерные для подготовительной и начала активной фазы суббури, сменившиеся ее увеличениями при переходе от активной к восстановительной фазе.

4.3. Сравнивая приведенные на рис. 4, а, б графики, видим, что явная связь между геомагнитными возмущениями и усилениями эмиссий атомарного кислорода наблюдалась также в интервале 1. Отмеченные в разделе 2.1 увеличение $I_{630.0}$ на ~ 300 Рл в 13:07–13:16 UT и активизация квазипериодических флук-

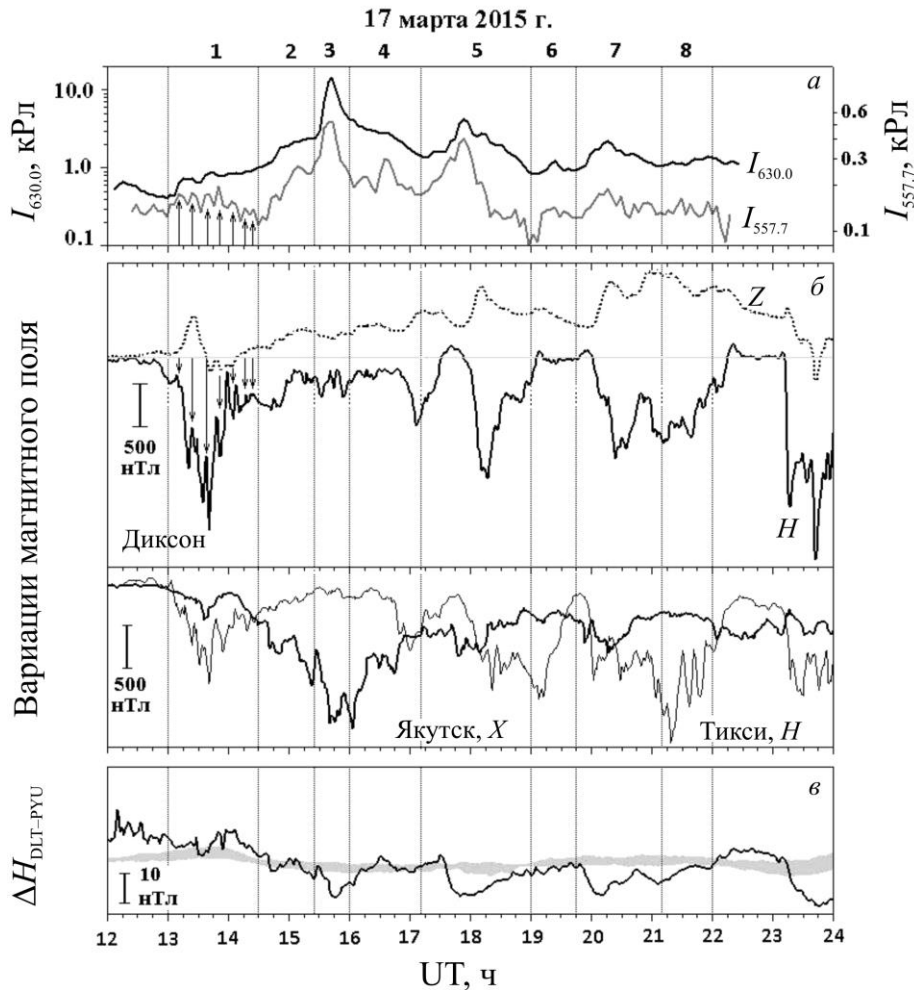


Рис. 4. Изменения: *a* — интенсивности эмиссий 630.0 и 557.7 нм (черная/серая линия) по данным САТИ-1М; *б* — *H*-, *X*- и *Z*-компонент магнитного поля в трех высокоширотных обсерваториях; *в* — $\Delta H_{DLT-PYU}$. В интервале 1 вертикальные стрелки показывают связь между семью близкими по продолжительности и времени появления квазипериодическими флуктуациями поля западного электроджета и $I_{577.7}$

туации $I_{557.7}$ с периодами ~12 мин совпадают в пределах временного разрешения данных САТИ-1М с началом в ~13:05 UT активной фазы суббури и появлением красных пятен на снимках, полученных ФИЛИН-1Ц. На панелях *a*, *б* рис. 4 стрелками показано, что в интервале 1 каждому из колебаний $I_{557.7}$ с периодами ~11–12 мин соответствует одно из множественных усилений западного электроджета с таким же периодом. Явная связь между пиками $I_{557.7}$ и понижениями *X*-компоненты магнитного поля в Якутске видна также в интервалах 2 и 3.

Рисунок 5 показывает соответствие между скачками динамического давления солнечного ветра P_{sw} , флуктуациями *H*-компоненты геомагнитного поля в обсерватории Диксон и вариациями *AL*-индекса. Мы полагаем, что причиной множественных усилений западного электроджета (в том числе начавшегося в Диксоне в ~13:05 UT), быстрых увеличений $I_{630.0}$, активизации флуктуаций $I_{557.7}$ и появления красных пятен могли быть скачки давления солнечного ветра [Meurant et al., 2004; Keika et al., 2009; Tsurutani et al., 2011].

Сжатия магнитосферы в интервале 1 подтверждаются данными спутника GOES-13 ($\lambda=285^\circ$ E):

зарегистрированные им в 13:00–14:00 UT (08:00–09:00 LT) три понижения B_r -компоненты магнитного поля — до -50, -100 и вновь до -50 нТл (рис. 5) — указывают на смещение магнитопаузы до орбиты спутника. Сжатия магнитосферы вызывают быстрые магнитозвуковые волны, распространяющиеся изотропно со скоростью ~1000 км/с, и связанные с ними альфвеновские волны, а также модуляцию магнитосферно-ионосферных токов и потоков высыпавшихся электронов, способных проникнуть до $h=100\text{--}400$ км и усилить эмиссии 557.7 и 630.0 нм [Meurant et al., 2004]. На рис. 5 показано, что в 13:00–14:00 UT волны сжатия (квазипериодические флуктуации модуля геомагнитного поля B_T) наблюдались на GOES-15 в секторе 04:00–05:00 LT. В рассматриваемом случае популяция электронов на оболочках $L\sim 2.5\text{--}3.2$ ($\phi\sim 51\text{--}56^\circ$), сопряженных с областью, попадающей в поле зрения САТИ-1М на $h=200\text{--}400$ км, могла увеличиться на первой ступени бури (~07:00–10:00 UT).

4.4. В течение всего рассматриваемого события изменения интенсивностей эмиссии 630.0 нм, наблюдавшиеся на САТИ-1М и в северном направлении на ИФП, были подобны (рис. 6, *a*). Отмеченные в раз-

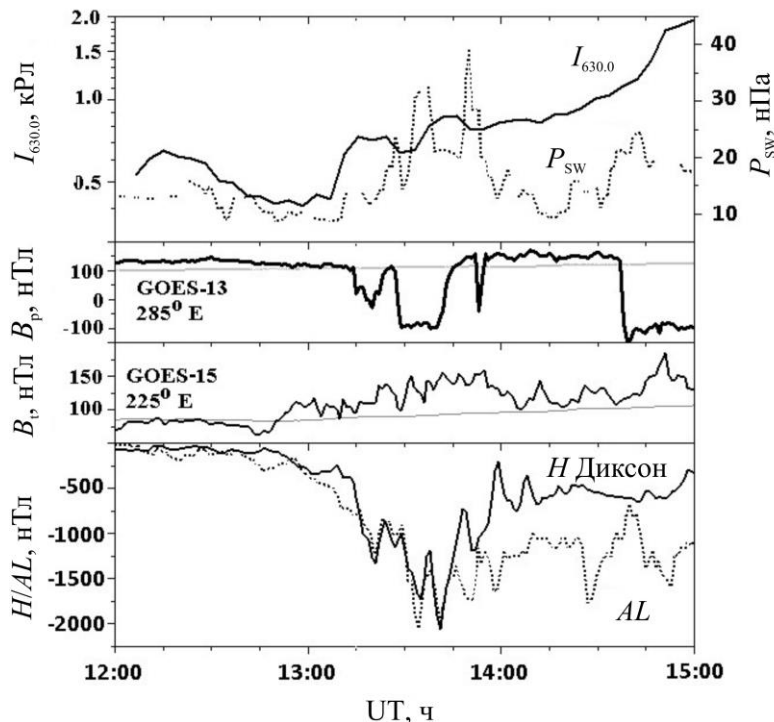


Рис. 5. Изменения (сверху вниз): $I_{630.0}$ и P_{SW} — динамического давления солнечного ветра; параллельной оси вращения Земли (B_p) компоненты и модуля (B_{\perp}) магнитного поля, измеренные на спутниках GOES-13 и -15 соответственно; H -компоненты геомагнитного поля в обсерватории Диксон и AL -индекса

деле 4.2 пики $I_{630.0}$ близки по времени к пикам I_N , а также к увеличениям I_Z и I_S (рис. 6, б). Почти синхронные увеличения I_N , I_Z , I_S были зарегистрированы также в начале интервала 1 в активную фазу суббури. Это подтверждает связь между активизациями западного электроджета во время магнитных бурь и усилениями атмосферных эмиссий, полностью охватывающими поле зрения камеры всего неба, размещенной в средних широтах [Shiokawa et al., 2005].

Тем не менее детали изменений I_N и сопровождающих их изменений T_N в интервалах 1, 2 заметно отличаются от тех, которые были зарегистрированы в направлениях в зенит и на юг. Во время синхронного увеличения I_N , I_Z , I_S , начавшегося около 13:00, T_N увеличилась на ~100 К, а T_Z и T_S почти не изменились. Немонотонным усилениям I_N в 13:30–15:00 UT соответствовали увеличения T_N , в то время как значения I_Z , I_S плавно уменьшались до минимальных для рассматриваемого события.

Анализ широтных распределений ПЭС показывает, что в начале интервала 1 рост I_N , T_N и $I_{630.0}$ наблюдался на широтах северной границы зоны положительного ионосферного возмущения, совпадающих с широтами экваториальной стенки ГИП, а изменения I_Z , T_Z , I_S , T_S — в самой этой зоне. В 13:30–14:45 UT изменения интенсивностей и температур наблюдались при переходе от положительного к отрицательному ионосферному возмущению, т. е. при изменении структуры ионосферы в исследуемой области. К 14:00 UT значения $\Delta N_m F2$ и $\Delta PЭС$ приблизились к нулю, а восточная граница области $\Delta PЭС > 0$, занимавшей в 12:00 UT на $\phi = 52.5^\circ$ сектор 12–23 LT, сместилась на ~17:00 LT ($\lambda \sim 45^\circ$, рис. 7,

б). Дно ГИП на $\lambda = 105^\circ$ расширилось до $\phi = 57.5^\circ$ (рис. 7, а, слева). К 14:45 UT основание экваториальной стенки ГИП приблизилось к полю зрения ИФП в северном направлении, а в направлении зенита эта стенка оказалась в поле зрения ИФП (рис. 7, а в центре). Указанные изменения структуры ГИП не позволяют определить положение его структурных элементов относительно полей зрения ИФП.

4.5. В интервалах 1, 2 наблюдаются также явные различия между значениями и изменениями T_N и T_Z , T_S . На рис. 6, б видно, что в 13:00 UT доплеровская температура в северном направлении всего на ~20 К отличалась от наблюдавшейся в направлениях на юг и в зенит. В интервале 1 и в первой половине интервала 2 плавно нарастающие T_Z и T_S были на 50–250 К меньше, чем немонотонно увеличивающаяся T_N , и сравнялись с ней в конце интервала 2 после того, как доплеровская температура в северном направлении стала уменьшаться. Начало понижения T_N в 15:05–15:09 UT совпадает (в пределах временного разрешения данных ИФП) с началом в 15:05–15:06 UT в Якутске двухступенчатого уменьшения X на ~600 нТл и смещением полярной стенки ГИП на широты поля зрения ИФП в северном направлении.

В интервале 3 доплеровская температура в исследуемых с помощью ИФП областях была максимальна в южном и минимальна в северном направлении. В пике интенсивностей, зафиксированном на ИФП в 15:35–15:45 UT во всех направлениях, значения T_N были меньше T_Z и T_S на ~100 и ~250 К соответственно. В это время поля зрения ИФП в северном

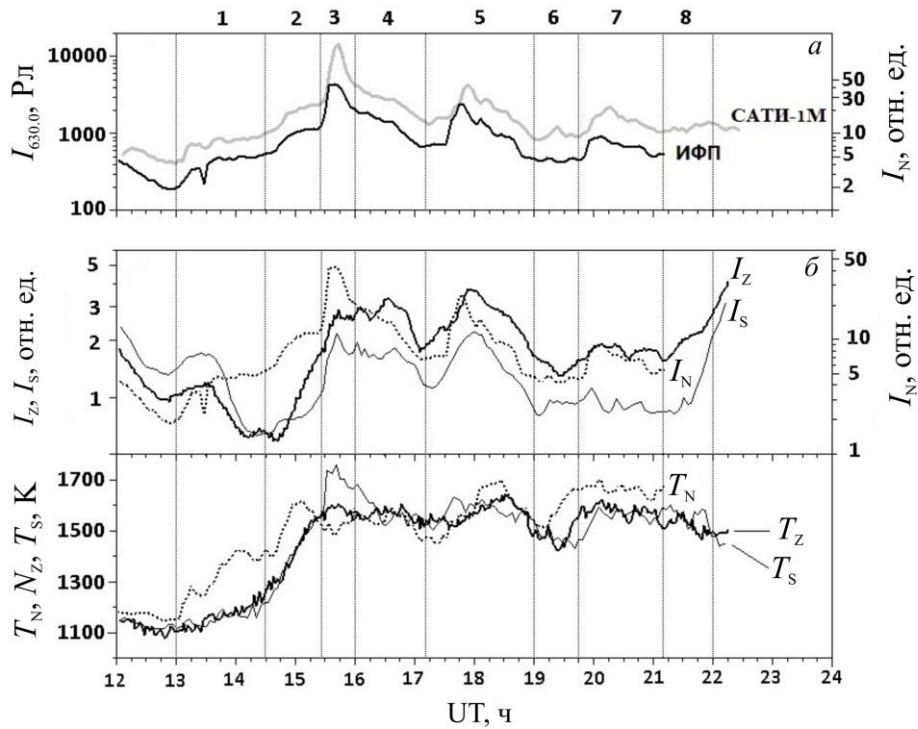


Рис. 6. Вариации: а — $I_{630.0}$ и I_N ; б — интенсивностей и доплеровских температур в направлениях на север, в зенит и на юг

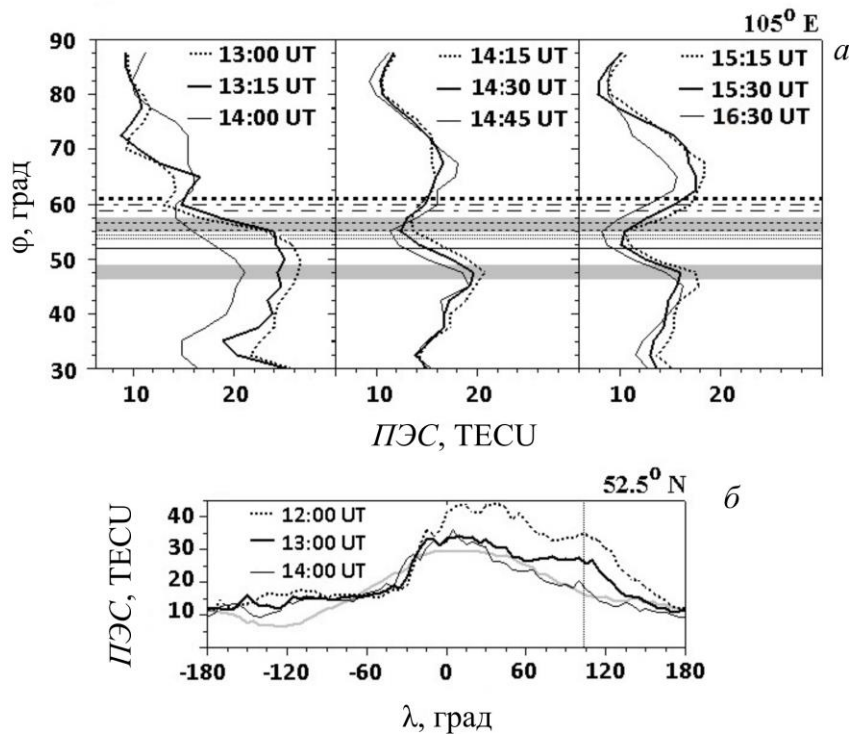


Рис. 7. Широтные профили ПЭС на меридиане 105° E (а) и долготные профили ПЭС на широте 52.5° N (б) в указанные моменты времени. На панели б серая линия соответствует фоновым значениям ПЭС. Вертикальная пунктирная линия отмечает долготу ГФО

и южном направлениях находились по разные стороны от дна ГИП (на его полярной и экваториальной стенках соответственно). Таким образом, в интервале 3 усиление суббуревой активности вызвало увеличение $I_{630.0}$ во всей зоне ГИП, а рост доплеровской температуры (аналогично тому, как это было в начале интервала 1) только в излучающей области,

расположенной вблизи широты вершины его экваториальной стенки.

После достижения пиковых значений и до середины интервала 4 значения I_Z и I_S оставались высокими, а I_N уменьшились в три раза. Анализ широтных профилей ПЭС, построенных для 16:00–16:30 UT, показал, что в этом временном интервале в поле зре-

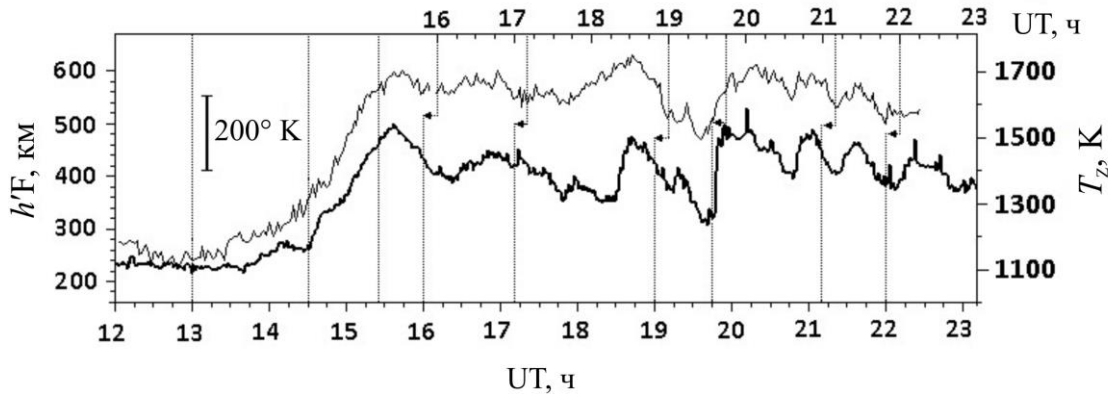


Рис. 8. Изменения минимальной действующей высоты F-области ионосферы (черная линия) и доплеровской температуры над ГФО (серая линия)

ния ИФП в направлениях на север, в зенит и на юг по-прежнему оставались полярная стенка ГИП, ее основание и вершина экваториальной стенки соответственно. В последующие часы высокие (низкие) доплеровские температуры наблюдались в основном одновременно с высокими (низкими) интенсивностями. Исключением является увеличение T_N на 150 К, начавшееся в 19:14 UT — за 19 мин до резкого роста I_N .

4.6. На рис. 8 видно, что изменения доплеровской температуры в зените над ГФО подобны изменениям минимальной действующей высоты F-области ионосферы над этой станцией. При этом после 16:00 UT наибольшее сходство между вариациями T_N и hF наблюдается при сдвиге графика T_N на ~10 мин вдоль оси времени. Таким образом, рост действующей высоты F-области следует за увеличением доплеровской температуры атомов кислорода, определенной по уширению линии 630.0 нм. Это дает основание полагать, что определяющим фактором, влияющим на усиление этой эмиссии после 16:00 UT, является повышенная температура в области измененного состава атмосферы и/или в полосе поляризационного джета [Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Khalipov et al., 2018]. Считается также, что во время геомагнитных возмущений, вследствие усиления энергообмена между плазмосферой и кольцевым током, в средних широтах повышается температура электронов на высотах области F [Khomich et al., 2008]. Механизмом усиления эмиссии 630.0 нм в случае высокой температуры могут быть столкновения атомов кислорода с тепловыми электронами в реакции $O(^3P)+e \rightarrow O(^1D)+e$ дополнительно к реакции диссоциативной рекомбинации, которая является основной для возбуждения эмиссии 630.0 нм в спокойных геомагнитных условиях.

4.7. На рис. 9, а показаны изменения отношения $I_{630.0}/I_{557.7}$, вычисленного по данным САТИ-1М, на рис. 9, б — отношений I_N/I_Z , $I_N/(2I_Z)$ и I_N/I_S , определенных по данным ИФП. Сплошные кривые на рис. 9, б построены по измеренным значениям интенсивностей, пунктирные — с учетом того, что при угле возвышения 30° длина луча, пересекающего излучающую область, в два раза больше, чем в зените.

Считается, что отношение $I_{630.0}/I_{557.7}$ можно использовать для определения типа сияний [Rassoul et al., 1993]. Однако в работе [Михалев и др., 2018] справедливо отмечено, что в бурю 17 марта 2015 г. патрульный спектрограф проводил измерения «под небольшими углами над горизонтом». Это не позволяет корректно использовать $I_{630.0}/I_{557.7}$ для определения типа среднеширотного сияния «в связи с возможным широтным разнесением эмиссионных слоев 630.0 и 557.7 нм». Уточняя это утверждение, отметим, что в нем речь идет о разности широт излучающих областей, попадающих в поле зрения САТИ-1М на разных высотах. Возможно, что по этой причине значения $I_{630.0}/I_{557.7} > 10$, характерные для SAR-дуги, были получены в интервалах 3, 4, 5 и 7, хотя, как показано на рис. 3, а, дуга, при условии ее излучения на $h=400$ км, могла попасть в поле зрения спектрографа только в интервале 2. Учитывая вышеизложенное, мы не будем использовать отношение $I_{630.0}/I_{557.7}$ для определения типа сияний, а лишь сравним его временной ход с динамикой магнитосферно-ионосферных возмущений и их проявлениями в структуре ГИП.

На рис. 7, а показано, что с 14:00 до 15:30 UT глубина ГИП увеличилась с 15 до 75 %, а его дно сместилось до $\varphi=52.5^\circ$, т. е. фактически до широты ГФО. По данным ионосферного зондирования, 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 (см. раздел 2 и рис. 3, з).

В момент появления F2s-отражений в поле зрения САТИ-1М на $h=200-400$ и $h=100$ км оказались полярная стенка и дно ГИП, где в интервале 3 были зафиксированы самые мощные синхронные увеличения $I_{630.0}$ и $I_{557.7}$. Приведенный на рис. 9, а график показывает, что в этом интервале произошло самое сильное пикообразное возрастание отношения $I_{630.0}/I_{557.7}$ до ~27. Меньшие возрастания $I_{630.0}/I_{557.7}$ до 17 и 12 наблюдались в интервалах 5 и 7, в которых тоже были зарегистрированы синхронные всплески интенсивностей рассматриваемых эмиссий. Широтная

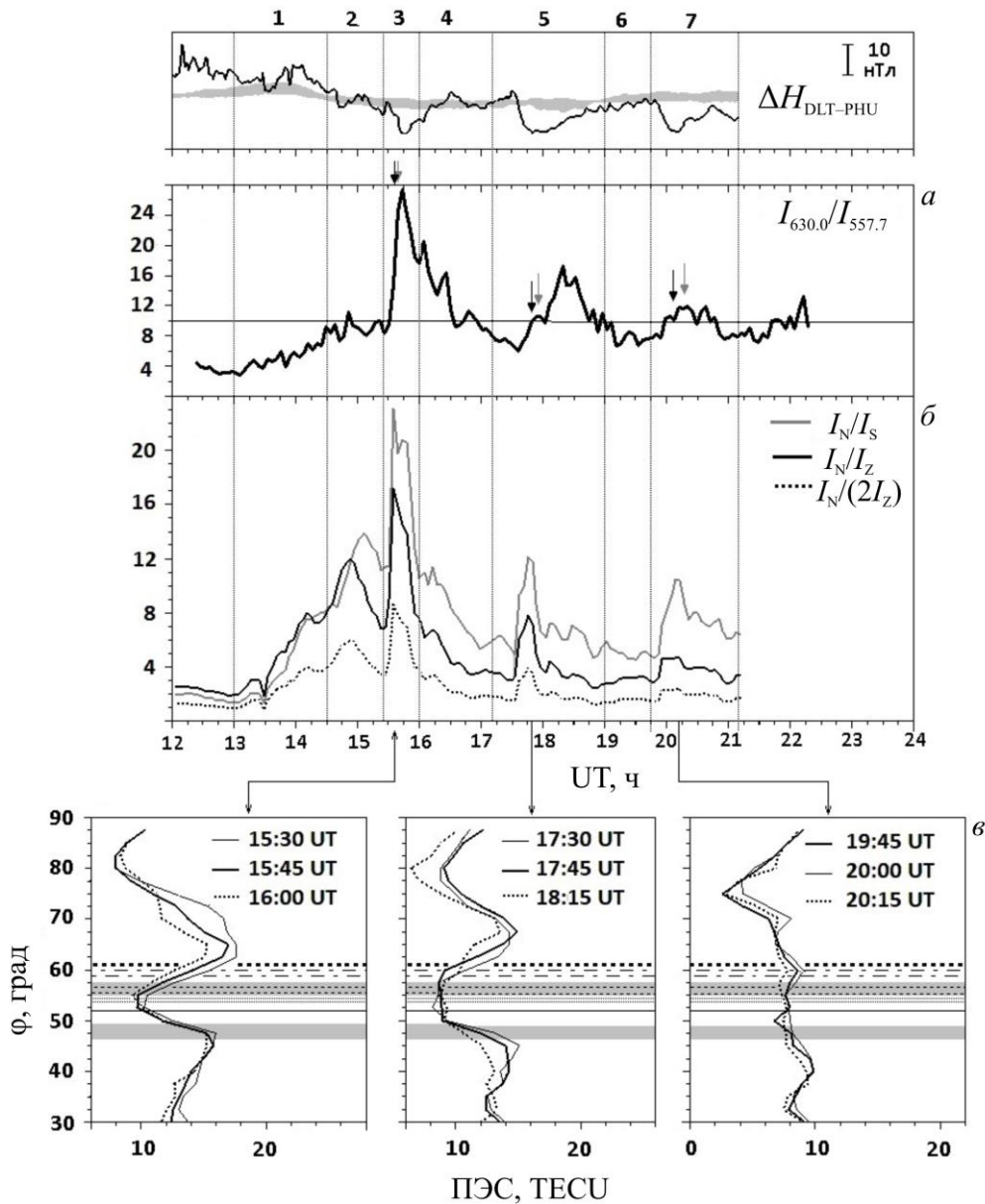


Рис. 9. Вариации отношений $I_{630.0}/I_{557.7}$ по данным САТИ-1М (а) и I_N/I_Z , $I_N/(2I_Z)$, I_N/I_S (б), а также широтные профили ПЭС в интервалах 3, 5 и 7 (в). Черные и серые стрелки отмечают максимумы всплесков $I_{630.0}$ и $I_{557.7}$. На верхней панели для сравнения показаны изменения $\Delta H_{DLT-PHU}$

структура ГИП в этих интервалах заметно отличалась от наблюдавшейся в интервале 3 (рис. 9, в). В интервале 5 из-за расширения ГИП к северу и к югу область измерения I_N и T_N сместилась на дно ГИП, а область измерения I_S и T_S приблизилась к основанию экваториальной стенки ГИП. В интервале 7 в поле зрения ИФП оказалась зона незначительно меняющихся с широтой значений ПЭС, расположенная между слабо выраженными стенками ГИП.

Сравнивая приведенные на рис. 9 графики, видим, что пики $I_{630.0}/I_{557.7}$ (рис. 9, а), так же как и пики I_N/I_Z , $I_N/(2I_Z)$ и I_N/I_S (рис. 9, б), наблюдались в интервалах, характеризующихся усиленной магнитосферной конвекцией (верхняя панель на рис. 9). Это указывает на известную тенденцию роста интенсивности эмиссии 630.0 нм с широтой при усилении поля магнитосферной конвекции. В интервалах 3, 5 и 7 максимумы $I_{630.0}$ опережают максимумы

$I_{557.7}$ на 3, 6 и 10 мин соответственно, что может быть связано с распространением общей зоны высвечивания обеих эмиссий, возбуждаемых на разных высотах, в сторону экватора при усилении магнитосферной конвекции.

Высота пиков $I_{630.0}/I_{557.7}$ уменьшается от 27 в интервале 3 до 17 и 12 в интервалах 5 и 7 соответственно. Пиковые значения I_N/I_Z и I_N/I_S тоже со временем уменьшаются. В интервале 5 они в 2.2 и 1.9 раза, а в интервале 7 — в 3.8 и 2.2 раза меньше, чем в интервале 3. Сравнивая изменения $I_{630.0}/I_{557.7}$, I_N/I_Z и I_N/I_S в интервалах 3, 5 и 7 с показанными на рис. 9, в широтными профилями ПЭС, видим, что уменьшение указанных отношений со временем могло быть обусловлено изменениями широтной структуры ГИП. Отношения понижаются с увеличением ширины ГИП, уменьшением его глубины и градиентов ПЭС на полярной и экваториальной стенках.

Проведенный нами анализ показывает, что на главных фазах магнитных бурь нужно с большой осторожностью использовать отношение $I_{630.0}/I_{557.7}$ для определения типа наблюдаемых в средних широтах сияний в тех случаях, когда $I_{630.0}$ и $I_{557.7}$ измерены при углах возвышения много меньших 90° , т. е. на различных широтах. При определении типа сияний наибольшие трудности возникают, если обследуемая оптическими инструментами излучающая область расположена в зоне ГИП.

5. ДИНАМИКА SAR-ДУГИ

В работе [Михалев и др., 2018] показано, что, по предварительным данным, у северного горизонта поля зрения камеры KEO Sentinel около 15:30 UT 17 марта образовалась полоса свечения, которая, смещаясь в сторону экватора, постепенно приобрела форму дуги. Эта дуга медленно перемещалась к экватору со средней (рассчитанной для высоты высвечивания ~ 400 км) скоростью ~ 20 м/с, при этом ее структура и интенсивность менялись. Скорость смещения и размеры наблюдавшейся дуги соответствовали параметрам SAR-дуг, приведенным, например, в работе [Иевенко, Алексеев, 2004].

Детальный анализ широтных распределений средней интенсивности эмиссии 630.0 нм в секторе $\lambda=98-108^\circ$, выполненный по данным KEO Sentinel, показал, что структура, определенная в [Михалев и др., 2018] как SAR-дуга, появилась на фоне диффузной эмиссии часом раньше, в 14:30 UT (21:30 LT), на $\varphi=55.9^\circ$ N ($\varphi'\sim 51.8^\circ$, $L\sim 3.2$). На рис. 4, б видно, что в это время глубина понижения горизонтальной компоненты магнитного поля в Якутске сравнялась с наблюдавшейся в Тикси. Три часа раньше, в 11:16 UT, SAR-дуга появилась восточнее ГФО (на $\lambda\approx 130^\circ$) примерно на тех же широтах ($\varphi'=52-59^\circ$, $L\sim 2.8-3.8$) [Иевенко, Парников, 2020]. На рис. 3, а видно, что SAR-дуга могла наблюдаться на ИФП в северном направлении в 14:30–15:00 UT и в зените в $\sim 17:30-19:00$ UT.

Графики на рис. 3, а и широтные распределения ПЭС, сопоставленные с широтными распределениями интенсивности эмиссии 630.0 нм (рис. 10), показывают, что соответствующий SAR-дуге пик интенсивности эмиссии 630.0 нм первоначально появился у основания полярной стенки ГИП (рис. 10, а). В 15:00–18:00 UT SAR-дуга находилась в области дна ГИП или у основания его экваториальной стенки (рис. 10, б), а после этого — в описанной в разделе 2.2 зоне слабо меняющихся с широтой низких значений ПЭС (панель з). В 15:30 UT центр SAR-дуги находился на расстоянии $\Delta\varphi'\sim 1.2^\circ$ к северу от ГФО, а в 17:30–19:00 UT — в зените над обсерваторией. По нашим оценкам, сделанным по данным KEO Sentinel, интенсивность SAR-дуги в окрестности зенита менялась в пределах 100–300 Рл. Мы полагаем, что излучение SAR-дуги внесло вклад в формирование пика I_Z в $\sim 18:00$ UT (интервал 5) — самого высокого из наблюдавшихся 17 марта 2015 г. в направлении зенита.

В большинстве работ считается, что образование классической SAR-дуги связано с притоком тепла из

внутренней магнитосферы в области плазмопаузы (см., например, [Mendillo et al., 2016; Иевенко, Парников, 2020]). Но существуют исследования, показывающие, что SAR-дуга может также образоваться в зоне поляризационного провала и связанного с ним узкого ионосферного провала [Khalipov et al., 1985; Foster et al., 1994; Sazykin et al., 2002; Chu et al., 2019]. Характерное время жизни узкого провала ионизации составляет 2–3 ч [Степанов и др., 2017]. Возможность появления SAR-дуги в области поляризационного джета показана также в [Sazykin et al., 2002]. Приведенные в ней модельные расчеты показывают, что в таких случаях слабая дуга образуется вследствие фрикционного нагрева атмосферы, приводящего к увеличению скорости диссоциативной рекомбинации и вероятности возбуждения атомов кислорода в состоянии 1D при столкновениях с тепловыми электронами. Дуги, связанные с поляризационным джетом, отличаются от классических SAR-дуг низкой интенсивностью, коротким временем жизни и тем, что появляются без существенного потока тепла из вышележащих слоев магнитосферы.

Возможно одновременное существование нескольких SAR-дуг, образованных разными источниками. Одновременная регистрация двух и более SAR-дуг отмечалась, например, в работах [Ievenko et al., 2008; Hong et al., 2020]. В работе [Ievenko et al., 2008] вторая SAR-дуга связывается с остаточной плазмопаузой. В изучаемом нами случае F3s-отражения, косвенно указывающие на наличие узкого провала ионизации вблизи ГФО, наблюдались в 15:52–19:00 UT (см. раздел 2.3). Вторая SAR-дуга эпизодически наблюдалась с 16:00 до 19:50 UT, т. е. она появилась на 68 мин позднее F3s-отражений и просуществовала еще 50 мин после их исчезновения. Пример широтного распределения интенсивности эмиссии 630.0 нм с двумя пиками, расположенными южнее полярной стенки ГИП, показан на рис. 10, в. Короткое время жизни второй SAR-дуги в нашем случае может указывать на ионосферный источник ее образования, связанный с поляризационным джетом [Sazykin et al., 2002].

Одинокая SAR-дуга присутствовала на полученных в ГФО изображениях до конца наблюдений ($\sim 22:30$ UT, 05:30 LT). К этому времени она сместилась на $\varphi=49.7^\circ$ N ($\varphi'\sim 45.6^\circ$, $L\sim 2$). Через ~ 1.5 ч наличие SAR-дуги на $L\sim 2.35-2.5$ было зафиксировано в Западном полушарии в Millstone Hill ($\varphi=42.6^\circ$ N, $\lambda=71.4^\circ$ W; $\varphi'=52.5^\circ$) [Hong et al., 2020]. Здесь SAR-дуга наблюдалась в течение всего времени оптических измерений, выполнявшихся 18 марта в 00:06–09:47 UT (19:00–05:00 LT) в восстановительную фазу бури. Hong et al. [2020] показали, что наблюдавшаяся ими SAR-дуга была классической, образованной притоком тепла из внутренней магнитосферы.

Таким образом, согласно литературным источникам и нашему исследованию, в бурю 17–18 марта 2015 г. SAR-дуга существовала более 23 ч. Она зародилась через 5 ч после начала главной фазы бури, наблюдалась до конца главной фазы и по крайней мере в течение 10.5 ч восстановительной фазы. Мы

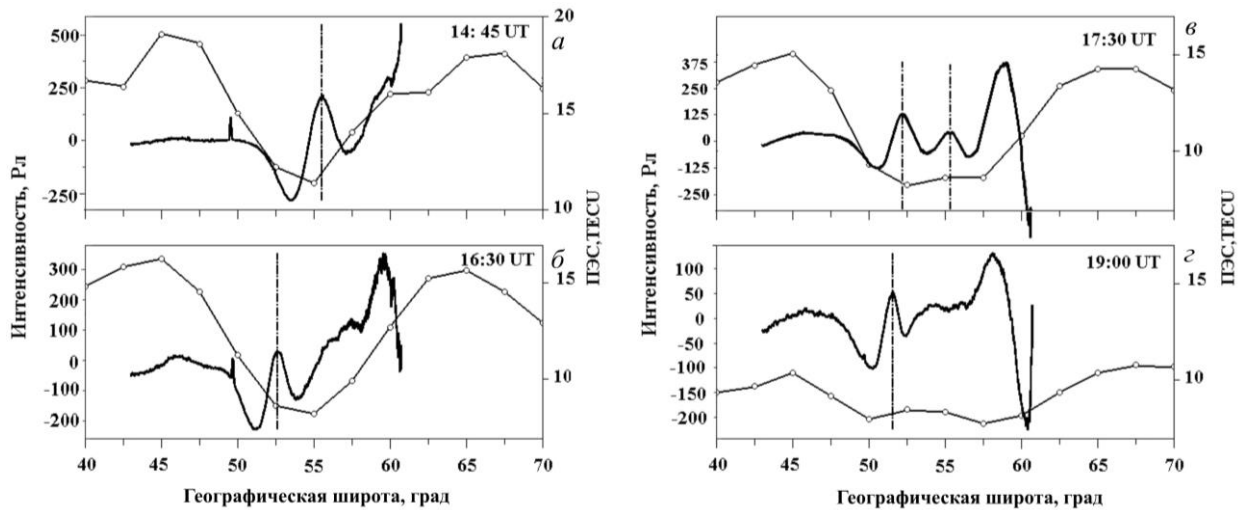


Рис. 10. Широтные распределения ПЭС (линия с кружками) и отклонений интенсивности эмиссии 630.0 нм в центре SAR-дуги (сплошная линия) от медленно меняющейся с широтой составляющей (определены по изображениям КЕО Sentinel). Медленно меняющаяся составляющая выделена из исходных данных путем сглаживания скользящим средним по 55 точкам. Оставшиеся после ее удаления временные ряды сглаживались по 11 точкам. Проведено усреднение значений интенсивности, полученных в секторе 98–108° Е. Расчет проведен для $h=400$ км. Вертикальные штрихпунктирные линии отмечают широту максимумов интенсивности стабильных дуг

полагаем, что по мере развития бури роль тепловых потоков из области взаимодействия кольцевого тока с плазмосферой постепенно возрастала и стала преобладающей после 19:00 UT 17 марта.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Комплексный анализ геомагнитных, ионосферных и оптических явлений выявил особенности эмиссий атомарного кислорода (557.7 и 630.0 нм), наблюдавшихся в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН в 12:00–22:30 UT 17 марта 2015 г., во время магнитной бури.

Показано, что усиления западного электроджета сопровождалось ростом интенсивности эмиссии 630.0 нм на всех широтах, находящихся в поле зрения приборов. Рост интенсивности эмиссии 630.0 нм сопровождался ростом доплеровской температуры в тех случаях, когда в фиксированном в пространстве поле зрения прибора находились широты экваториальной стенки или дна ГИП.

Наиболее сильные синхронные увеличения интенсивностей эмиссий 557.7 и 630 нм были зарегистрированы во время трех активизаций западного электроджета, развивавшихся при усилении магнитосферной конвекции.

Установлено, что значения $I_{630.0}/I_{557.7}$ и соотношений между интенсивностями эмиссий 630.0 нм, зарегистрированными в направлениях на север, в зенит и на юг, зависят от положения наблюдаемых в этих направлениях излучающих областей относительно дна ГИП. Пиковые значения отношений были максимальны в 15:25–16:00 UT, когда интенсивности эмиссии 630.0 нм в северном направлении были получены на широтах полярной стенки ГИП, а интенсивности эмиссии 630.0 нм в направлениях в зенит и на юг и эмиссии 557.7 нм — на широтах дна и экваториальной стенки ГИП. Пиковые значения уменьшились после того, как в поле зрения прибо-

ров в северном направлении попали широты дна ГИП, и упали до минимальных, когда значения всех интенсивностей были измерены в области слабо меняющихся малых значений ПЭС.

Обнаружено, что SAR-дуга появилась на широтах основания полярной стенки ГИП во время начала смещения центра западного электроджета в сторону экватора. Затем дуга сместилась на широты дна и основания экваториальной стенки ГИП, находившихся вблизи ГФО. В окрестности зенита интенсивность SAR-дуги менялась в пределах 100–300 Рл.

Показано, что через 68 мин после появления на ионограммах F3s-отражений на изображениях, полученных камерой всего неба, стала видна вторая, более слабая дуга, расположенная на 2.5–3.0° севернее основной. Судя по наличию F3s-отражений, первичным источником второй дуги мог быть поляризационный джет, связанный с узким ионосферным провалом. Наличие двух разнесенных по широте стабильных красных дуг указывает на возможность одновременного существования двух источников SAR-дуг, различающихся по происходящим в них процессам нагрева.

Подчеркнем, что перечисленные выше результаты получены при исследовании только одной сильной бури и их повторяемость должна быть проверена на других магнитных бурях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278) и частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-05-00665а. Результаты получены на базе наблюдений, проводимых с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckprf.ru/ckp/3056>]. Мы благодарим национальные институты, поддерживающие ИНТЕРМАГНЕТ, за обеспечение высокого качества данных магнитных обсерваторий, участвующих в проекте [www.intermagnet.org], а также менеджеров проектов

ACE, GPS, OMNI и THEMIS за данные, доступные на сайте [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев В.Н., Величко В.А., Надубович Ю.А. Исследование высот свечения и положения южной границы фонового свечения 6300 Å. *Физика верхней атмосферы высоких широт*. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1975. Вып. 3. С. 124–133.

Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Физика ионосферы*. М.: Наука, 1988. 528 с.

Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б. и др. Регистрация параметров верхней атмосферы Восточной Сибири при помощи интерферометра Фабри—Перо КЕО Scientific «Arinae». *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 3. С. 70–87. DOI: [10.12737/stp-33201707](https://doi.org/10.12737/stp-33201707).

Демин М.Г. Ионосфера Земли: особенности и механизмы. *Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли. Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75*. М., 2015. С. 295–346.

Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Разуваев О.И. Структура и динамика высокоширотной ионосферы. *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца*. 1986. Вып. 76. С. 165–177.

Зверев В.Л., Фельдштейн Я.И., Воробьев В.Г. Авроральное свечение к экватору от овала полярных сияний. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2012. Т. 52, № 1. С. 64–72.

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. DOI: [10.12737/21740](https://doi.org/10.12737/21740).

Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. Влияние суббури и бури на динамику SAR-дуги. Статистический анализ. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2004. Т. 44, № 5. С. 643–654.

Иевенко И.Б., Парников С.Г. Наземные и спутниковые наблюдения SAR-дуги в вечернем секторе MLT в начале магнитной бури 17 марта 2015 г. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2020. Т. 60, № 6. С. 751–761. DOI: [10.31857/S0016794020050090](https://doi.org/10.31857/S0016794020050090).

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. DOI: [10.12737/szf-54201909](https://doi.org/10.12737/szf-54201909).

Михалев А.В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В. и др. Спектральные и фотометрические характеристики среднеширотного сияния во время магнитной бури 17 марта 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 4. С. 54–61. DOI: [10.12737/szf-44201806](https://doi.org/10.12737/szf-44201806).

Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И. и др. Многофункциональный ЛЧМ-иозонд для мониторинга ионосферы. *Гелиогеофизические исследования*. 2013. Вып. 4. С. 24–31. Доступна на <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=166> (дата обращения 10 ноября 2020 г.).

Полех Н.М., Золотухина Н.А., Романова Е.Б. и др. Ионосферные эффекты магнитосферных и термосферных возмущений 17–19 марта 2015 г. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2016. Т. 56, № 5. С. 591–605. DOI: [10.7868/S0016794016040179](https://doi.org/10.7868/S0016794016040179).

Старков Г.В. Планетарная динамика аврорального свечения. *Физика околоземного космического пространства*. Апатиты: Изд-во Кольск. науч. центра РАН, 2000. Т. 1. 706 с.

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.

Тащилин А.В., Леонович Л.А. Моделирование ночных свечений красной и зеленой линий атомарного кислорода

для умеренно-возмущенных геомагнитных условий на средних широтах. *Солнечно-земная физика*. 2016. Т. 2, № 4. С. 76–84. DOI: [10.12737/21491](https://doi.org/10.12737/21491).

Фельдштейн Я.И., Воробьев В.Г., Зверев В.Л. Планетарные закономерности полярных сияний. Итоги МГГ (обзор). *Геомагнетизм и аэронаука*. 2010. Т. 50, № 4. С. 435–458.

Филиппов В.М., Шестакова Л.В., Гальперин Ю.И. Полоса быстрого дрейфа ионов в субавроральной F-области и ее проявление в структуре высокоширотной ионосферы. *Космические исследования*. 1984. Т. 22, № 4. С. 557–564.

Шиндин А.В., Клименко В.В., Кологин Д.А. и др. Пространственные характеристики области генерации искусственного свечения ионосферы в линии 630 нм при воздействии радиоизлучением стенда «Сура». *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2017. Т. 60, № 11. С. 949–966.

Aruliah A., Förster M., Hood R., et al. Comparing high-latitude thermospheric winds from Fabry—Perot interferometer (FPI) and challenging mini-satellite payload (CHAMP) accelerometer measurements. *Ann. Geophys.* 2019. Vol. 37. P. 1095–1120. DOI: [10.5194/angeo-37-1095-2019](https://doi.org/10.5194/angeo-37-1095-2019).

Balan N., Shiokawa K., Otsuka Y., et al. A physical mechanism of positive ionospheric storms at low latitudes and midlatitudes. *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115, A02304. DOI: [10.1029/2009JA014515](https://doi.org/10.1029/2009JA014515).

Bame S.J., Asbridge J.R., Felthouser H.E., et al. Characteristics of the plasma sheet in the Earth's magnetotail. *J. Geophys. Res.* 1967. Vol. 72, iss. 1. P. 113–129. DOI: [10.1029/JZ072i001p00113](https://doi.org/10.1029/JZ072i001p00113).

Baumjohann W., Paschmann G., Cattell C.A. Average plasma properties in the central plasma sheet. *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94, iss. 6. P. 6597–6606. DOI: [10.1029/JA094iA06p06597](https://doi.org/10.1029/JA094iA06p06597).

Blanc M., Richmond A.D. The ionospheric disturbance dynamo. *J. Geophys. Res.* 1980. Vol. 85, iss. A4. P. 1669–1686. DOI: [10.1029/JA085iA04p01669](https://doi.org/10.1029/JA085iA04p01669).

Chu X., Malaspina D., Gallardo-Lacourt B., et al. Identifying STEVE's magnetospheric driver using conjugate observations in the magnetosphere and on the ground. *Geophys. Res. Lett.* 2019. Vol. 46, iss. 22. P. 12665–12674.

Deminov M.G., Shubin V.N. Empirical model of the location of the main ionospheric trough. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018. Vol. 58, iss. 3. P. 338–347. DOI: [10.1134/S0016793218030064](https://doi.org/10.1134/S0016793218030064).

Ding G.-X., He F., Zhang X.-X., Chen B. A new auroral boundary determination algorithm based on observations from TIMED/GUVI and DMSP/SSUSI. *J. Geophys. Res.* 2017. Vol. 122. P. 2162–2173. DOI: [10.1002/2016JA023295](https://doi.org/10.1002/2016JA023295).

Feldstein Y.I., Vorobjev V.G., Zverev V.L., Förster M. Investigations of the auroral luminosity distribution and the dynamics of discrete auroral forms in a historical retrospective. *History Geo Space Sci.* 2014. Vol. 5. P. 81–134. DOI: [10.5194/hgss-5-81-2014](https://doi.org/10.5194/hgss-5-81-2014).

Foster J.C., Buonsanto M.J., Mendillo M., et al. Coordinated stable auroral red arc observations: Relationship to plasma convection. *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99. P. 11,429–11,439.

Frey H.U. Localized aurora beyond the auroral oval. *Rev. Geophys.* 2007. Vol. 45, RG1003. DOI: [10.1029/2005RG000174](https://doi.org/10.1029/2005RG000174).

Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Lepping R.P., Schwenn R. Interplanetary phenomena associated with very intense geomagnetic storms. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. Vol. 64. P. 173–181.

Gussenhoven M.S., Hardy D.A., Heinemann N. Systematics of the equatorward diffuse auroral boundary. *J. Geophys. Res.* 1983. Vol. 88, iss. A7. P. 5692–5708.

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.* 2016. Vol. 121. P. 11,213–11,234. DOI: [10.1002/2016JA023165](https://doi.org/10.1002/2016JA023165).

- He M., Liu L., Wan W., Zhao B. A study on the nighttime midlatitude ionospheric trough. *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116, iss. A5, A05315. DOI: [10.1029/2010JA016252](https://doi.org/10.1029/2010JA016252).
- Hong J., Kim Y.H., Kam H., et al. Simultaneous observations of SAR arc and its ionospheric response at subauroral conjugate points ($L \approx 2.5$) during the St. Patrick's Day Storm in 2015. *J. Geophys. Res.* 2020. Vol. 124, iss. 4. DOI: [10.1029/2019JA027321](https://doi.org/10.1029/2019JA027321).
- Ievenko I.B., Parnikov S.G., Alexeyev V.N. Relationship of the diffuse aurora and SAR arc dynamics to substorms and storms. *Adv. Space Res.* 2008. Vol. 41, no. 8. P. 1252–1260. DOI: [10.1016/j.asr.2007.07.030](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.07.030).
- 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 Climate.* 2016. Vol. 6, A9. DOI: [10.1051/swsc/2016004](https://doi.org/10.1051/swsc/2016004).
- Keika K., Nakamura R., Baumjohann W., et al. Substorm expansion triggered by a sudden impulse front propagating from the dayside magnetopause. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114, A00C24. DOI: [10.1029/2008JA013445](https://doi.org/10.1029/2008JA013445).
- Khalipov V.L., Sivtseva L.D., Filippov V.M., et al. Step-like profiles of electron density in the subauroral lower F-region in the morning sector and possible mechanisms of their formation during substorms: the comparison of data of ground-based ionosondes with the AUREOL-3 satellite measurements. *Results of the ARCAD 3 project and of the recent programmes in magnetospheric and ionospheric physics, Toulouse, 1984*. Toulouse, Cepadues-editions, 1985. P. 895–916.
- Khalipov V.L., Stepanov A.E., Ievenko I.B., et al. Formation of red arc in the polarization jet ban. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 179. P. 494–503. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.08.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.08.005).
- Khomich V.Yu., Semenov A.I., Shefov N.N. *Airglow as an Indicator of Upper Atmospheric Structure and Dynamics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 756 p.
- Kosar B.C., MacDonald E.A., Case N.A., et al. A case study comparing citizen science aurora data with global auroral boundaries derived from satellite imagery and empirical models. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 177. P. 274–282. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.05.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.05.006).
- Le G., Lühr H., Anderson B.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. Vol. 43, iss. 4. P. 2396–2404. DOI: [10.1002/2016GL068257](https://doi.org/10.1002/2016GL068257).
- McPherron R.L. The use of ground magnetograms to time the onset of magnetospheric substorms. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. 1978. Vol. 30. P. 149–163.
- Megan Gillies D., Knudsen D., Donovan E., et al. Identifying the 630 nm auroral arc emission height: A comparison of the triangulation, FAC profile, and electron density methods. *J. Geophys. Res.* 2017. Vol. 122. P. 8181–8197. DOI: [10.1002/2016JA023758](https://doi.org/10.1002/2016JA023758).
- Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Rev. Geophys.* 2006. Vol. 44, iss. 4, RG4001. DOI: [10.1029/2005RG000193](https://doi.org/10.1029/2005RG000193).
- Mendillo M., Baumgardner J., Wroten J., et al. Imaging magnetospheric boundaries at ionospheric heights. *J. Geophys. Res.* 2013. Vol. 118, iss. 11. P. 7294–7305. DOI: [10.1002/2013JA019267](https://doi.org/10.1002/2013JA019267).
- Mendillo M., Finan R., Baumgardner J., et al. A stable auroral red (SAR) arc with multiple emission features. *J. Geophys. Res.* 2016. Vol. 121. P. 10,564–10,577. DOI: [10.1002/2016JA023258](https://doi.org/10.1002/2016JA023258).
- Meurant M., Gerard J.-C., Blockx C., et al. Propagation of electron and proton shock-induced aurora and the role of the interplanetary magnetic field and solar wind. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109, A10210. DOI: [10.1029/2004JA010453](https://doi.org/10.1029/2004JA010453).
- Mishin V.V., Lunyushkin S.B., Mikhalev A.V., et al. Extreme geomagnetic and optical disturbances over Irkutsk during the 2003 November 20 superstorm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 181, pt. A. P. 68–78. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.10.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.013).
- Moldwin M.B., Downward L., Rassoul H.K., et al. A new model of the location of the plasmopause: CRRES results. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, iss. A11. P. SMP 2-1–SMP 2-9. DOI: [10.1029/2001JA009211](https://doi.org/10.1029/2001JA009211).
- Nagai T., Baker D.N., Highbie P.R. Development of substorm activity in multiple-onset substorms at synchronous orbit. *J. Geophys. Res.* 1983. Vol. 88, iss. A9. P. 6994–7004.
- Newell P.T., Sotirelis T., Wing S. Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: The global precipitation budget. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114, A09207. DOI: [10.1029/2009JA014326](https://doi.org/10.1029/2009JA014326).
- Ni B., Thorne R.M. Zhang X., et al. Origins of the Earth's diffuse auroral precipitation. *Space Sci. Rev.* 2016. Vol. 200. P. 205–259. DOI: [10.1007/s11214-016-0234-7](https://doi.org/10.1007/s11214-016-0234-7).
- Polekh N., Zolotukhina N., Kurkin V., et al. Dynamics of ionospheric disturbances during the 17–19 March 2015 geomagnetic storm over East Asia. *Adv. Space Res.* 2017. Vol. 60, iss. 11. P. 2464–2476. DOI: [10.1016/j.asr.2017.09.030](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.030).
- Pryse S.E., Kersley L., Malan D., Bishop G.J. Parameterization of the main ionospheric trough in the European sector. *Radio Sci.* 2006. Vol. 41, RS5S14. DOI: [10.1029/2005RS003364](https://doi.org/10.1029/2005RS003364).
- Rassoul H.K., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A., Slater D.W. Spectrometric and photometric observations of low-latitude aurorae. *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98, iss. A5. P. 7695–7709. DOI: [10.1029/92JA02269](https://doi.org/10.1029/92JA02269).
- Sazykin S., Fejer B.G., Galperin Yu.I., et al. Polarization jet events and excitation of weak SAR arcs. *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29, iss. 12. P. 26-1–26-4. DOI: [10.1029/2001GL014388](https://doi.org/10.1029/2001GL014388).
- Shinbori A., Otsuka Y., Tsugawa T., et al. Temporal and spatial variations of storm time midlatitude ionospheric trough based on global GNSS-TEC and Arase satellite observations. *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45. P. 7362–7370. DOI: [10.1029/2018GL078723](https://doi.org/10.1029/2018GL078723).
- Shiokawa K., Ogawa T., Kamide Y. Low-latitude auroras observed in Japan: 1999–2004. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, A05202. DOI: [10.1029/2004JA010706](https://doi.org/10.1029/2004JA010706).
- Suzuki H., Chino H., Sano Y., et al. Imaging-based observations of low-latitude auroras during 2001–2004 at Nayoro, Japan. *Earth, Planets and Space*. 2015. Vol. 67, 107. DOI: [10.1186/s40623-015-0278-z](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0278-z).
- Tsurutani B.T., Lakhina G.S., Verkhoglyadova O.P., et al. A review of interplanetary discontinuities and their geomagnetic effects. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. Vol. 73. P. 5–19. DOI: [10.1016/j.jastp.2010.04.001](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.04.001).
- Zolotukhina N., Polekh N., Kurkin V., et al. Ionospheric effects of St. Patrick's storm over Asian Russia: 17–19 March 2015. *J. Geophys. Res.* 2017. Vol. 122. P. 2484–2504. DOI: [10.1002/2016JA023180](https://doi.org/10.1002/2016JA023180).
- URL: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation> (дата обращения 2 апреля 2021 г.).
- URL: <https://www.intermagnet.org/data-donnee/download-eng.php> (дата обращения 16 октября 2015 г.).
- URL: <ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse> (дата обращения 15 октября 2015 г.).
- URL: https://www.ngdc.noaa.gov/stp/ovation_prime/data (дата обращения 20 марта 2020 г.).
- URL: <http://ckprf.ru/ckp/3056> (дата обращения 15 апреля 2015 г.).
- URL: www.intermagnet.org (дата обращения 21 марта 2015 г.).
- URL: http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public (дата обращения 15 июля 2015 г.).

Как цитировать эту статью:

Золотухина Н.А., Полех Н.М., Михалев А.В., Белецкий А.Б., Подлесный С.В. Особенности эмиссий 630.0 и 557.7 нм в области главного ионосферного провала: 17 марта 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 3. С. 57–71. DOI: [10.12737/szf-73202105](https://doi.org/10.12737/szf-73202105).